

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Patent Application of:

Kenichi TORII, et al.

Application No.: TBA

Group Art Unit: TBA

Filed: March 30, 2004

Examiner: TBA

For: RAMAN AMPLIFIER AND OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM USING THE SAME

**SUBMISSION OF CERTIFIED COPY OF PRIOR FOREIGN
APPLICATION IN ACCORDANCE
WITH THE REQUIREMENTS OF 37 C.F.R. § 1.55**

Commissioner for Patents
PO Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

In accordance with the provisions of 37 C.F.R. § 1.55, the applicants submit herewith a certified copy of the following foreign application:

Japanese Patent Application No. 2003-093023

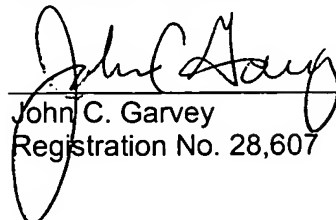
Filed: March 31, 2003

It is respectfully requested that the applicant be given the benefit of the foreign filing date as evidenced by the certified papers attached hereto, in accordance with the requirements of 35 U.S.C. § 119.

Respectfully submitted,

STAAS & HALSEY LLP

Date: 3-30-04

By: 
John C. Garvey
Registration No. 28,607

1201 New York Ave, N.W., Suite 700
Washington, D.C. 20005
Telephone: (202) 434-1500
Facsimile: (202) 434-1501

7

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2003年 3月31日
Date of Application:

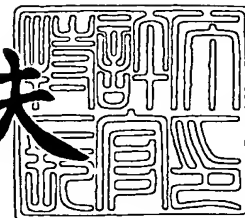
出願番号 特願2003-093023
Application Number:
[ST. 10/C]: [JP2003-093023]

出願人 富士通株式会社
Applicant(s):

2003年12月25日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2003-3107569

【書類名】 特許願

【整理番号】 0350269

【提出日】 平成15年 3月31日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H04B 10/12

【発明の名称】 ラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システム

【請求項の数】 5

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 鳥居 健一

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 内藤 崇男

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 田中 俊毅

【発明者】

 【住所又は居所】 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

 【氏名】 幸 雅洋

【特許出願人】

 【識別番号】 000005223

 【氏名又は名称】 富士通株式会社

【代理人】

【識別番号】 100078330

【弁理士】

【氏名又は名称】 笹島 富二雄

【電話番号】 03-3508-9577

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 009232

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9719433

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書**【発明の名称】** ラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システム**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第 1 励起光発生部と、

該第 1 励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された 1 波長以上の励起光を発生する第 2 励起光発生部と、

前記第 1 および第 2 励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器を備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 3】

ラマンシフト周波数の略 2 倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれかが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

、
前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、

該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに低減する複数の利得等化器と、

該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 4】

ラマンシフト周波数と同程度あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

、
信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 5】

請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 つに記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、波長多重信号光をラマン効果を利用して増幅するラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムに関し、特に、ラマン利得の波長依存性によって生じる信号光パワーの波長偏差の低減を図るための技術に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来、長距離の光伝送システムにおいては、光信号を電気信号に変換し、等化増幅 (reshaping)、タイミング抽出 (retiming) および 識別再生 (regenerating) を行う再生中継器を用いて伝送を行っていた。しかし、現在では光増幅器の実用化が進み、光増幅器を線形中継器として用いる光増幅中継伝送方式が検討されている。光再生中継器を光増幅中継器に置き換えることにより、中継器内の部品点数を大幅に削減し、信頼性を確保すると共に大幅なコストダウンが見込まれる。

【0003】

また、光伝送システムの大容量化を実現する 1 つの方法として、1 本の光伝送路に 2 つ以上の異なる波長を持つ光信号を多重して伝送する波長多重 (WDM) 光伝送方式が注目されている。WDM 光伝送方式と光増幅中継伝送方式を組み合わせた WDM 光増幅中継伝送方式においては、光増幅器を用いて 2 つ以上の異なる波長を持つ光信号を一括して増幅することが可能であり、簡素な構成 (経済的) で、大容量かつ長距離伝送が実現可能である。

【0004】

光増幅中継伝送システムの中継器にはエルビウムドープファイバ増幅器 (Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA) が一般的に用いられている。例えば、EDFA の利得波長帯域は $1.55\mu\text{m}$ 帯 (C-バンド) であり、その利得波長帯域を長波長へシフトした GS-EDFA (Gain shifted-EDFA) の利得波長帯域は $1.58\mu\text{m}$ 帯 (L-バンド) である。上記の EDFA および GS-EDFA は、それぞれ 30nm 以上の利得波長帯域幅を有し、C-バンドおよび L-バンドに対応した合分波器を用いて 2 つの信号光波長帯域を併用することにより、6

0 nm以上の帯域幅を実現することも可能である。

【0005】

さらに、近年になってラマン増幅の適用が盛んに検討されている。ラマン増幅の利得ピーク光周波数は、例えば石英系ファイバを増幅媒体としたとき、その増幅媒体に供給する励起光の周波数よりも約 13.2 THz だけ低周波側にシフトした光周波数となる。これを光波長について言い換えると、ラマン増幅は励起光波長よりも長波長側に利得帯域を持ち、例えば $1.45 \mu\text{m}$ の励起光波長に対するラマン利得ピーク波長は、励起光波長を約 100 nm だけ長波長側にシフトした $1.55 \mu\text{m}$ 付近となる。

【0006】

なお、以下の説明では、増幅媒体に与えられる励起光の周波数とその励起光に起因して得られるラマン利得のピーク周波数との差分のことを「ラマンシフト周波数」と呼ぶことにする。

【0007】

このようなラマン増幅を利用した光増幅器において、要求される信号光波長に対して増幅作用を得るためには、ラマンシフト周波数を考慮して励起光波長を設定可能であることが重要である。また、異なる中心波長を持つ複数の励起光を用いることでラマン増幅の利得波長特性を平坦化できることが知られている。例えば、複数の励起光源の発振波長および出力光パワーをそれぞれ調整することにより、ラマン増幅の利得波長帯域幅として 100 nm 程度を確保したという報告がある（例えば、非特許文献1参照）。

【0008】

図24は、従来のラマン増幅器の構成例を示す図である。

図24において、従来のラマン増幅器は、複数の励起光 $P_1 \sim P_K$ を発生する多波長励起光源101と、その多波長励起光源101から出力される励起光 $P_1 \sim P_K$ を増幅媒体である光ファイバ100に供給する合波器102とを備えて構成され、多波長励起光源101から合波器102を介して光ファイバ100に供給された励起光 $P_1 \sim P_K$ が信号光 $S_1 \sim S_L$ とは逆方向に伝搬する。この従来のラマン増幅器では、例えば図25に示すように、複数の信号光 $S_1 \sim S_L$ が所

要の間隔で配置された信号光波長帯域と、その信号光波長帯域に応じて複数の励起光 $P_1 \sim P_K$ が配置された励起光波長帯域とを分けた波長配置が適用される。また、信号光波長帯域について平坦な利得波長特性を得るため、例えば図 2 6 に示すように利得等化器 1 0 3 を併用した構成も知られている。

【0 0 0 9】

ところで、大容量長距離伝送システムを実現するためには、信号光波長帯域幅の拡大（広帯域化）が重要である。この広帯域化の実現のためにラマン増幅を利用した場合、信号光および励起光がある波長帯域内で混在するような波長配置の適用が有効であることが知られている（例えば、特許文献 1、並びに、本出願人の先願である特願 2 0 0 1 - 2 4 4 7 9 8 号および特願 2 0 0 1 - 3 9 0 3 6 6 号参照）。

【0 0 1 0】

図 2 7 は、上記のような波長配置を適用したラマン増幅器の構成例を示す図である。また、図 2 8 は、図 2 7 のラマン増幅器における波長配置例を示す図である。図 2 8 に示すように複数の励起光 $P_1 \sim P_M$ のうちの一部が信号光波長帯域内に混在する場合には、図 2 7 に示すように励起光合波用の光デバイスとして光サーキュレータ 1 0 4 が使用される。なお、ここでは、信号光波長帯域内に混在しない励起光を $P_1 \sim P_Q$ とし、信号光波長帯域内に混在する励起光を $P_{Q+1} \sim P_M$ としている。また、前述の図 2 6 に示した構成と同様にして、信号光帯域に亘って平坦な利得波長特性を得るために利得等化器 1 0 3 を併用する構成（図 2 7 中の破線部分）もある。

【0 0 1 1】

上記のような信号光と励起光がある帯域内に混在する波長配置が適用されたラマン増幅器においては、励起光同士の間でラマン増幅が大きく生じるため、短波長側の励起光に要求されるパワーが極端に大きくなることが知られている。このため、励起光源の合波構成が複雑化する上、短波長側の励起光により発生する自然放出光雑音が増大し、短波長側信号光の雑音特性が劣化してしまうという問題がある。

【0 0 1 2】

この問題を解決する手法として、例えば、各励起光のパワーについて変調をかけ、ラマンシフト周波数に近い周波数差を有する励起光パワー同士の時間的な重なりを低減することにより、それらの励起光間に生じるラマン増幅の効率を低くして、ラマン増幅器の雑音特性を改善すると共に短波長側の励起光パワーを低減する技術が提案されている（例えば、本出願人の先願である特願 2 0 0 2 - 3 3 4 0 3 7 号参照）。具体的には、例えば図 2 9 に示すような各励起光パワーの変調が行われる。この図 2 9 の一例は、ラマンシフト周波数 Δf_{RAMAN} の 3 分の 1（石英系光ファイバを増幅媒体とした場合、 $\Delta f_{\text{RAMAN}} = 13.2 \text{ THz}$ 、 $\Delta f_{\text{RAMAN}} / 3 = 4.4 \text{ THz}$ ）に対応する波長間隔に配置した 8 波長の励起光を用いる場合について、それぞれの励起光パワーの変化を示している。ただし、ここでは変調後の光パルスのデューティを 50%としている。励起光間に生じるラマン増幅の効率が最も高まるのは励起光同士がラマンシフト周波数 Δf_{RAMAN} だけ離れている場合、すなわち、上記の一例では、励起光 P_1 と励起光 P_4 、励起光 P_2 と励起光 P_5 、励起光 P_3 と励起光 P_6 、励起光 P_4 と励起光 P_7 、励起光 P_5 と励起光 P_8 のそれぞれの組み合わせである。従って、これらが時間的に重ならないように各励起光のパワーに変調をかけることで、励起光間のラマン増幅が低減されて上記の問題を解決することが可能となる。

【0 0 1 3】

【特許文献 1】

特開 2 0 0 2 - 2 2 9 0 8 4 号公報

【非特許文献 1】

Y. Emori, et al., "100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12- wavelength-channel WDM high power laser diodes", OFC' 99, PD19, 1999.

【0 0 1 4】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記のような従来のラマン増幅器については次の（１）～（４）に示すような問題点がある。

【0 0 1 5】

(1) 利得等化の際の損失増大によるシステム性能劣化

複数の波長の励起光を用いて得られるラマン利得の波長に対するプロファイルは、例えば図30に示すように励起光の波長数に応じた複数のピークを有するものとなるが、それぞれのピーク波長は個々の励起光を単独で使用した場合に得られる利得ピーク波長とは異なる値を示すようになる。具体的に、図30の一例は、1433 nmおよび1464 nmの2つの波長の励起光を使用した場合の波長に対するラマン利得の関係を示していて、図中の細線で示すように各々の励起光を単独で使用した場合には、ラマン利得プロファイルのピーク波長がそれぞれ1529.6 nmおよび1565.5 nmとなる。これに対して、図中の太線で示すように2つの波長の励起光を同時に用いた場合には、利得プロファイルが1538.2 nmおよび1563.9 nmにピークを有するようになり、1433 nmの励起光に対応した利得ピークは8.6 nmだけ長波長側にシフトし、1464 nmの励起光に対応した利得ピークは1.6 nmだけ短波長側にシフトすることになる。

【0016】

従って、複数の波長の励起光を用いたラマン増幅器においては、励起光の波長を等間隔に配置したとしても、実際に得られるラマン利得のプロファイルは等間隔の利得ピークを持たないことになる。このため、前述の図26などに示したような利得等化器を併用して行われる利得等化に際しては、複雑な損失プロファイルをもつ利得等化器を用いる必要がある。しかし、そのような利得等化器は一般に大きな損失を持つため、システム性能劣化の要因となり得る。また、例えば、グレーティング方向を光ファイバ軸から傾けた公知のスラント型ファイバブラッググレーティングなどのように、単独で複雑な損失プロファイルを実現する光デバイスも存在するが、そのようなデバイスは利得等化可能な波長範囲が一般に40 nm程度以下に限定されてしまう。このため、40 nmを超えるような広い信号光波長帯域を有するシステムにおいては、利得等化の都度、信号光を分波した後利得等化を行い再び合波するといった処理が必要となり、分波器および合波器における過剰損失が問題となる場合がある。

【0017】

(2) 励起光の不等間隔配置による非効率化

上記(1)の問題点を回避して簡易な構成の利得等化器を使用できるようにするためには、例えば、ラマン利得プロファイルのピーク波長が等間隔となるように励起光の波長を選択することが考えられる。具体的に、例えば図31の実線で示すように23nm間隔で4つの利得ピークを得るためには、1430nm、1448nm、1470nmおよび1502nmという波長間隔が一定でない4つの波長の励起光を使用することが必要になる。このような波長配置が不等間隔の励起光を用いれば、図31の点線で示すような周期的な損失波長特性を持つ簡易な構成の利得等化器を使用することが可能になる。

【0018】

しかしながら、前述の図29を参照して説明したように、信号光および励起光がある帯域内に混在する波長配置においては、励起光間のラマン増幅を効率的に行うために、励起光の周波数間隔をラマンシフト周波数の整数分の1に設定することが有効であり、複数の励起光の波長を不等間隔で配置することは、上記のような波長設定を適用したラマン増幅器における非効率化を招くことになる。

【0019】

また、本出願人は、前述の特願2001-244798号や特願2001-390366号において、信号光帯域内に混在する励起光のスペクトルを狭窄化する光フィルタを用いたり、励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを用いたりすることによって、システム性能の改善を図ることができることを示した。この際、励起光が等間隔に配置されていれば、それぞれの用途のために周期性をもつ光フィルタを適用することが可能になり多数の光フィルタを用いる必要がなくなるため損失およびコストの点で有利となる。一方、励起光が不等間隔に配置されてしまうと、上記のような利点が失われることになる。

【0020】

(3) 短波長側の信号光帯域における利得偏差の増大によるシステム性能の劣化

前述の図27～図29に示したような増幅帯域幅がラマンシフト周波数と同程度またはそれ以上となるようなラマン増幅器においては、短波長側ほど利得偏差

が大きくなるという特性を持つ。この特性について図 3 2 および図 3 3 を用いて具体的に説明する。図 3 2 は、単一の波長（例えば 1460.3 nm）の励起光に対して、その励起光の短波長側および長波長側に複数の信号光を配置した一例であり、図 3 3 は、図 3 2 の信号光および励起光の波長配置において得られるラマン利得の波長特性を示したものである。各図に示すように、信号光帯域内に混在する 1460.3 nm の励起光は、励起光よりも長波長側（低周波側）の信号光に対して利得を与える一方、短波長側（高周波側）の信号光に対して損失を与える。また、ここでは図示しないが、増幅媒体として用いられる光ファイバの実効断面積は短波長ほど小さくなることが知られている。このため、励起光より短波長側の信号光と励起光との間で発生するラマン効果（損失）は、励起光より長波長側の信号光と励起光との間で発生するラマン効果（利得）よりも効率が高まるようになる。図 3 3 の具体例では、損失ピークの絶対値が約 20.0 dB となるのに対して、利得ピークの絶対値が約 14.1 dB となっており、短波長側のラマン効果の効率が長波長側よりも高くなることが分かる。

【0021】

上記のような 1 波の励起光によって得られるラマン効果の波長特性を踏まえて、次に、複数の波長の励起光を使用したラマン増幅器の利得波長特性について考える。図 3 4 は、ラマンシフト周波数の約 4 倍となる増幅帯域幅を有するラマン増幅器について計算した利得波長特性の一例である。なお、図 3 4 の利得波長特性は、ラマンシフト周波数を 13.2 THz とし、その約 4 倍に相当する 56.5 THz の増幅帯域幅、波長にすると 1277.3 nm ~ 1682.3 nm の範囲に該当する 405 nm の増幅帯域幅を有するラマン増幅器について、13 波長の励起光 $P_1 \sim P_{13}$ を 4.4 THz（ラマンシフト周波数の 3 分の 1）の等しい周波数間隔に配置すると共に（下記の表 1 参照）、前述の図 2 9 に示したような各励起光に対する変調を施して励起光間のラマン増幅を抑圧するようにした場合の計算結果である。

【0022】

【表 1】

励起光	光周波数 (THz)	光波長 (nm)
P ₁	244.9	1224.1
P ₂	240.5	1246.5
P ₃	236.1	1269.8
P ₄	231.7	1293.9
P ₅	227.3	1318.9
P ₆	222.9	1345.0
P ₇	218.5	1372.0
P ₈	214.1	1400.2
P ₉	209.7	1429.6
P ₁₀	205.3	1460.3
P ₁₁	200.9	1492.2
P ₁₂	196.5	1525.7
P ₁₃	192.1	1560.6

【0023】

図34中の太線で示した13波長の励起光使用時に得られるラマン利得のプロファイルは、図34中の細線で示した各励起光P₁～P₁₃を単独で用いた時に得られる各々のラマン利得の重ね合わせにより近似的に求めている。また、ここでは、全励起光による利得の極小値が略10dBとなるように各励起光のパワーが調整されている。このような計算結果では、全励起光による利得の平均値は約12.0dBとなり、利得偏差は約8.7dBとなっている。

【0024】

図34に示すように、最長波長の利得ピーク付近の増幅に寄与する励起光は最長波長の励起光P₁₃のみであり、複数の励起光が寄与するその他の利得ピークと比較して励起光P₁₃の負担は大きい。このため、平坦な利得を得るためには、最長波長の励起光P₁₃によるラマン効果で比較的大きな利得が得られる必要がある。この場合、上記の図33に示した関係より明らかなように、励起光P₁₃より短波長側に発生する損失のピークも比較的大きくなる。

【0025】

この励起光P₁₃による損失ピークを補償するため、最長波長の励起光P₁₃

よりも周波数で 26.4 THz 高周波（短波長）側に存在する励起光 P_7 によるラマン効果は、大きな利得をもつ必要がある。これと同様にして、励起光 P_7 よりも周波数で 26.4 THz 高周波側の励起光 P_1 によるラマン効果は、さらに大きな利得をもつ必要がある。このため、短波長側での利得偏差は特に大きくなる。次の表 2 に示すデータは、各波長の励起光 $P_1 \sim P_{13}$ にそれぞれ対応したラマン利得の極大値および極小値をまとめたものであり、図 35 は、表 2 の各データを横軸を波長、縦軸を利得としてプロットしたものである。

【0026】

【表 2】

励起光	極大波長 (nm)	極大周波数 (THz)	極大値 (dB)	極小波長 (nm)	極小周波数 (THz)	極小値 (dB)
P_1	1301.2	230.4	18.2	1310.3	228.8	9.9
P_2	1322.4	226.7	18.2	1336.0	224.4	10.1
P_3	1348.6	222.3	15.3	1362.7	220.0	10.1
P_4	1378.4	217.5	14.2	1392.4	215.3	10.0
P_5	1408.1	212.9	13.4	1422.2	210.8	10.1
P_6	1438.5	208.4	14.4	1450.4	206.7	9.9
P_7	1466.0	204.5	13.7	1479.7	202.6	9.9
P_8	1495.2	200.5	14.1	1513.3	198.1	10.1
P_9	1528.8	196.1	11.7	1547.7	193.7	10.1
P_{10}	1565.5	191.5	11.6	1584.5	189.2	10.2
P_{11}	1601.5	187.2	11.0	1620.5	185.0	10.1
P_{12}	1640.9	182.7	11.3	1659.1	180.7	10.1
P_{13}	1672.9	179.2	10.6			

【0027】

表 2 および図 35 から明らかなように、信号光の波長帯域の拡大に伴って短波長側の利得偏差が拡大するため、要求される利得等化器の構成が複雑なものとなり損失が増大し、システム性能を劣化させる要因となる。

【0028】

(4) 利得波長特性の形状が複雑化することによるシステム性能の劣化

前述の図 34 に示した計算結果からも推察されるように、ラマン増幅器の増幅帯域幅が増大すると利得波長特性が複雑化する。例えば、図 34 に示した利得波

長特性のうちの増幅帯域部分を拡大した図 3 6 に示すように、当該部分の利得波長特性は、利得偏差の大きさが略同程度となる複数の波長帯 B_1 , B_2 , B_3 に区分できるような複雑な形状となる。このような複雑な形状の利得波長特性を有するラマン増幅器に対して、一般的に使用される周期的な損失特性を有する光フィルタを適用しても有効な利得等化を行うことは困難である。

【0029】

図 3 7 は、図 3 6 の利得波長特性に対して周期的な損失特性を有する光フィルタを適用して利得等化を行った場合の一例を示した図である。図中の細線が利得等化前の特性、太線が利得等化器の損失波長特性、極太線が利得等化後の特性をそれぞれ表している。ここでは、所要の利得を確保しつつ、図 3 6 で大きな利得偏差が発生している波長帯 B_1 についての利得偏差が低減可能となるように、2 種類の周期性光フィルタを用いて利得等化を行う。具体的に、利得等化器として用いる 2 種類の光フィルタは、周期 3.76 THz 、振幅 3.0 dB および中心周波数 230.4 THz の損失波長特性を有するものと、周期 4.41 THz 、振幅 1.2 dB および中心周波数 231.1 THz の損失波長特性を有するものとを組み合わせている。図中の極太線で表された利得等化後の特性を見ると、短波長側の波長帯 B_1 に関しては、利得偏差が低減され、かつ、 10 dB 前後の利得を確保できているが、それ以外の波長帯 B_2 および波長帯 B_3 に関しては、利得偏差が増大し、利得の値が大きく減少していることが分かる。

【0030】

従って、図 3 6 のようなラマン利得の波長偏差を平坦化するためには、より大きな損失偏差と複雑な損失波長特性を持つ利得等化器の適用が要求される。このような利得等化器は大きな損失を持つため、システム性能を劣化させる要因となる。また、単独で複雑な損失波長特性を実現可能なスラント型ファイバブラッググレーティングなどの公知の光デバイスを適用したとしても、前述した (1) の問題点で説明したのと同様にして、利得等化可能な波長範囲が制限されてしまうため、信号光帯域幅の増大とともに分波器および合波器における過剰損失が増加し、システム性能を劣化させる要因となる。

【0031】

本発明は、上述した（１）～（４）の各問題点に着目してなされたもので、システム性能劣化を抑えながらラマン利得の波長偏差を容易に低減できるラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

【0032】

【課題を解決するための手段】

上記の目的を達成するため、第１の発明にかかるラマン増幅器は、波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第１励起光発生部と、該第１励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された１波長以上の励起光を発生する第２励起光発生部と、前記第１および第２励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されるものである。

【0033】

かかる構成のラマン増幅器では、等波長間隔で配置された第１励起光と同時に、その短波長側または長波長側の帯域に配置された第２励起光を増幅媒体に供給され、信号光波長帯域における利得ピーク波長が実質的に等間隔に並んだ利得波長特性に従って波長多重信号光のラマン増幅が行われるようになる。これにより、例えば、ラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有する、簡略な構成で低損失の利得等化器を利用して、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減することができ、システム性能の改善を図ることが可能になる。

【0034】

また、第２の発明にかかるラマン増幅器は、ラマンシフト周波数の略２倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号

光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれかが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと、前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに低減する複数の利得等化器と、該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成されるものである。

【0 0 3 5】

かかる構成のラマン増幅器では、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値か極大値の一方が略同一となるように複数の励起光のパワーが制御された状態で波長多重信号光のラマン増幅が行われ、そして、ラマン増幅後の波長多重信号光は、ラマン利得の波長偏差に応じて設定された複数の波長帯ごとに分波されて利得等化が行われる。このとき各波長帯に対応した利得等化器として簡略な構成で低損失のものが使用できるようになるため、利得等化に起因したシステム性能の劣化を抑えることが可能になる。

【0 0 3 6】

また、第3の発明にかかるラマン増幅器は、ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、前記励起光源で発生する励起

光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと、信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されるものである。

【0037】

かかる構成のラマン増幅器では、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が基準利得値を境界に略正負均等に並ぶように複数の励起光のパワーが制御された状態で波長多重信号光のラマン増幅が行われ、そのラマン増幅された波長多重信号光の全波長帯域に亘るパワーの波長偏差が、簡略な構成で低損失の利得等化器によって一括して低減されるようになり、利得等化に起因したシステム性能の劣化を抑えることが可能になる。

【0038】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。なお、全図を通して同一の符号は同一または相当部分を示すものとする。

【0039】

図1は、本発明の第1実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。また、図2は、図1のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【0040】

図1において、第1実施形態のラマン増幅器は、例えば、増幅媒体としての光ファイバ10を伝搬するWDM信号光をラマン増幅するための励起光を発生する多波長励起光源11と、その多波長励起光源11で発生した励起光を光ファイバ10に与える合波部12と、ラマン増幅の利得波長特性に応じてWDM信号光に発生する波長間の光パワー偏差を低減する利得等化器13と、を備えて構成される。

【0041】

光ファイバ10は、例えば、本ラマン増幅器が適用される光伝送システムの端局または中継局間を接続する光伝送路とすることができる。また、光伝送路とは別に設けた非線形効果の発生し易いラマン増幅用光ファイバを適用してもよい。

前者の場合は分布型ラマン増幅器となり、後者の場合は集中型ラマン増幅器となる。この光ファイバ 10 を一方向（図 1 では右方）に伝搬する WDM 信号光は、図 2 に示すように波長の異なる複数の信号光 $S_1 \sim S_L$ を含んでいる。

【0042】

多波長励起光源 11 は、例えば、第 1 励起光発生部 20、第 2 励起光発生部 21 および合波器 22 を有する。第 1 励起光発生部 20 は、波長の異なる複数の励起光 $P_1 \sim P_K$ を所要のパワーで出力する。各励起光 $P_1 \sim P_K$ の波長は、光ファイバ 10 を伝搬する信号光 $S_1 \sim S_L$ の波長に応じて設定されており、具体的には図 2 に示すように、信号光 $S_1 \sim S_L$ の波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側にシフトさせた帯域内に各励起光 $P_1 \sim P_K$ が等しい波長間隔で配置されている。なお、以下の説明では、励起光 $P_1 \sim P_K$ のことを第 1 励起光と総称することにする。

【0043】

第 2 励起光発生部 21 は、第 1 励起光の波長帯域よりも短波長側に波長配置された励起光 P_A と、第 1 励起光の波長帯域よりも長波長側に波長配置された励起光 P_B とを所要のパワーでそれぞれ出力する。短波長側の励起光 P_A は、具体的には図 2 に示すように、第 1 励起光のうちの最短波長の励起光 P_1 よりもさらに短波長側の帯域に 2 波の励起光 P_{A1} , P_{A2} が所要の波長間隔で配置されている。また、長波長側の励起光 P_B は、第 1 励起光のうちの最長波長の励起光 P_K よりもさらに長波長側の帯域に 2 波の励起光 P_{B1} , P_{B2} が所要の波長間隔で配置されている。なお、以下の説明では、励起光 P_{A1} , P_{A2} , P_{B1} , P_{B2} のことを第 2 励起光と総称することにする。ただし、ここでは第 1 励起光の波長帯域に対して短波長側および長波長側の両方の帯域に複数の励起光をそれぞれ配置するようにしたが、本発明はこれに限らず、短波長側および長波長側のいずれかの帯域に少なくとも 1 つの励起光を配置して、それを第 2 励起光とすることが可能である。

【0044】

合波器 22 は、各励起光発生部 20, 21 から出力される第 1 および第 2 励起光を合波し、それを合波部 12 に送る。

上記の多波長励起光源 11 は、例えば図 3 に示すような具体的な構成により実現することが可能である。図 3 の構成例では、各波長の励起光 $P_1 \sim P_K$, P_{A1} , P_{A2} , P_{B1} , P_{B2} にそれぞれ対応した励起光源が用意され、各励起光源からの出力光が合波器 22 の各入力ポートに送られて合波される。そして、ここでは合波された励起光が複数のシステム（図では 4 つのシステム $SYS1 \sim SYS4$ ）に対応させて分岐され、その分岐光うちの 1 つが合波部 12 に与えられる。

【0045】

合波部 12 は、多波長励起光源 11 からの第 1 および第 2 励起光を光ファイバ 10 の信号光出力側の一端に与えると共に、光ファイバ 10 を伝搬してラマン増幅された WDM 信号光を後段の利得等化器 13 に伝える。ここでは、合波部 12 により光ファイバ 10 に与えられた第 1 および第 2 励起光は、WDM 信号光の伝搬方向とは逆方向に光ファイバ 10 内を伝搬することになる。この合波部 12 としては、図 2 に示したような信号光波長帯域と励起光波長帯域とが分かれた波長配置が適用される場合には、例えば WDM カプラを用いることができる。また、ここでは図示しないが励起光が信号光波長帯域の一部に混在するような波長配置が適用される場合には、例えば光サーキュレータを合波部 12 として使用することが可能である。

【0046】

利得等化器 13 は、多波長励起光源 11 からの第 1 および第 2 励起光が供給された光ファイバ 10 を伝搬してラマン増幅された WDM 信号光が合波部 12 を介して与えられる。この利得等化器 13 は、ラマン増幅の利得波長特性に対応した透過（または損失）波長特性を有し、上記 WDM 信号光に発生した波長間の光パワー偏差を低減して平坦な WDM 信号光を生成する。利得等化器 13 の具体的な構成としては、後述するようにラマン増幅の利得波長特性のピークが等しい波長間隔で並ぶようになるため、例えば図 4 に示すような周期的な透過波長特性を持つマッハツェンダ型光フィルタなどの一般的な周期光フィルタを使用することができる。

【0047】

次に、第1実施形態のラマン増幅器の作用について説明する。

本実施形態のラマン増幅器では、信号光 $S_1 \sim S_L$ の波長帯域に対応した従来と同様の第1励起光 $P_1 \sim P_K$ に加えて、その第1励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の帯域に配置された第2励起光 P_A, P_B が、増幅媒体としての光ファイバ10に与えられることにより、光ファイバ10におけるラマン増幅の利得ピーク波長が信号光波長帯域について等しい波長間隔で並ぶようになる。

【0048】

図5は、本ラマン増幅器により実現される利得波長特性の具体例を示した図である。ここでは、第2励起光を加えたことによる効果を明らかにするために、光ファイバ10に対して第1励起光のみを供給したときの利得波長特性（細線）と、第1および第2励起光の両方を供給したときの利得波長特性（太線）とが重ねて示してある。また、次の表3に示すデータは、図5に示した各特性の利得ピーク波長と隣り合う利得ピークの周波数間隔とをまとめたものである。

【0049】

【表3】

第1励起光のみ供給		第1, 2励起光を供給	
ピーク波長 (nm)	周波数間隔 (THz)	ピーク波長 (nm)	周波数間隔 (THz)
-	-	1445	-
-	-	1472	3.9
1510	-	1505	4.4
1537	3.5	1539	4.4
1575	4.7	1575	4.4
1603	3.4	1609	4.1
-	-	1651	4.7
-	-	1682	3.4

【0050】

図5および表3に示す利得波長特性の具体例では、第1励起光として1409.0 nm、1438.8 nm、1469.8 nmおよび1502.2 nmの4つ

の波長の励起光 $P_1 \sim P_4$ が設定されている。また、その第 1 励起光の波長帯域よりも短波長側に配置される第 2 励起光として 1353.0 nm および 1380.5 nm の 2 つの波長の励起光 P_{A1} , P_{A2} が設定され、長波長側に配置される第 2 励起光として 1536.1 nm および 1571.5 nm の 2 つの波長の励起光 P_{B1} , P_{B2} が設定されている。さらに、第 1 および第 2 励起光のいずれについても各励起光の波長間隔は、周波数にして 4.4 THz の等間隔に設定されている。加えて、前述の図 29 に示したような励起光パワーの変調を行い、励起光間に生じるラマン増幅の効率が小さくなるような措置が施されている。なお、上記の波長配置においては、長波長側の第 2 励起光が信号光波長帯域の一部に混在することになるため、合波部 12 としては光サーキュレータが使用される。

【0051】

上記のような励起光の波長配置において、第 1 励起光のみを光ファイバ 10 に与えた場合の利得波長特性は、短波長側から 2 番目の利得ピークと 3 番目の利得ピークとの間隔 (4.7 THz) のみが励起光の間隔 (4.4 THz) に近い値となり、その外側のピークの間隔は励起光の間隔よりも狭く (3.5 THz , 3.4 THz) なっていて、利得ピークが等間隔には並んでいないことが分かる。これに対して、第 1 および第 2 励起光を光ファイバ 10 に与えた場合の利得波長特性は、信号光波長帯域内に存在する 3 番目の利得ピークから 6 番目の利得ピークまでの間隔 (4.4 THz または 4.1 THz) が励起光の間隔 (4.4 THz) に近い値となっていて、利得ピークが略等間隔に並んでいることが分かる。

【0052】

従って、光ファイバ 10 を伝搬する WDM 信号光は、上記のようなピークが略等間隔で並んだ利得波長特性に応じてラマン増幅されるようになるため、ラマン増幅後の WDM 信号光に生じる波長間のパワー偏差も周期的に変化するようになる。これにより、前述の図 4 に示したように、ラマン増幅の各利得ピーク波長で透過率が極小（損失が極大）となり、各利得ピークの中間の波長で透過率が極大（損失が極小）となるような周期的なフィルタ特性を持つ利得等化器 13 を用いて、WDM 信号光の波長間のパワー偏差を効率的に平坦化することが可能になる。このような周期的に変化するプロファイルを持つ利得等化器 13 はマッハツェ

ンダ型光フィルタなどの一般的な周期光フィルタを用いて容易に実現することができ、上記のような周期性光フィルタは簡略な構成で損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避できる。また、上記のような周期的な利得等化器 13 は、利得等化可能な波長範囲が非常に広いため、従来のように WDM 信号光を分波して所要の帯域ごとに利得等化を行い再び合波するといった必要がなくなり、分波器や合波器における過剰損失の問題を解消することが可能となる。

【0053】

なお、上記の第 1 実施形態の説明では、複数の励起光間に生じるラマン増幅の効率が小さくなるように励起光パワーの変調を行う場合の一例を示したが、励起光パワーの変調を行わない構成のラマン増幅器についても本発明は有効であり、これについては、以下に示す他の実施形態においても同様である。

【0054】

次に、本発明の第 2 実施形態について説明する。

図 6 は、第 2 実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図 6 において、本実施形態のラマン増幅器は、前述の図 1 に示した第 1 実施形態の構成について、ラマン増幅後の WDM 信号光パワーの波長特性をモニタするための光カプラ 14 およびモニタ部 15 と、そのモニタ部 15 での検出結果に基づいて第 2 励起光発生部 21 を制御する制御部 16 とを設けたものである。上記以外の他の部分の構成は第 1 実施形態の構成と同一であるためここでの説明を省略する。

【0055】

光カプラ 14 は、例えば、合波部 12 から利得等化器 13 に送られる WDM 信号光の一部を分岐し、その分岐光をモニタ部 15 に出力する。モニタ部 15 は、光カプラ 14 で分岐された WDM 信号光についての波長に対する光パワーの変化（光スペクトル）をモニタし、そのモニタ結果を制御部 16 に出力する。

【0056】

制御部 16 は、モニタ部 15 からのモニタ結果に基づいて、信号光波長帯域についてのラマン増幅の利得プロファイルを判断し、その利得プロファイルが予め

設定した形状に近づくように、第2励起光発生部21で発生する第2励起光のパワー若しくは波長を制御する。

【0057】

前述した第1実施形態のラマン増幅器では、励起光源の故障あるいは経時劣化などによって複数の励起光のうちのいずれかの強度や波長が変化すると、ラマン増幅の利得プロファイルが予め設定した正常な状態の利得プロファイルから変化してしまう。そこで、第2実施形態のラマン増幅器では、上記のような構成を適用することにより、ラマン増幅後のWDM信号光のスペクトルがモニタ部15でモニタされ、そのモニタ結果を基に実際に得られるラマン増幅の利得プロファイルが制御部16で判断される。そして、判断された実際の利得プロファイルが予め設定された利得プロファイルと比較されて何らかの変化が生じた場合には、制御部16によって、元の正常な状態の利得プロファイルが得られるように第2励起光のパワー若しくは波長が最適化される。

【0058】

具体的に、実際に得られるラマン増幅の利得プロファイルに基づいて、例えば、前述の第1実施形態において例示した4つの波長の第1励起光（1409.0 nm、1438.8 nm、1469.8 nm、1502.2 nm）のうちの1438.8 nmの励起光P₂のパワーが減少していることが判断された場合には、ラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側に位置する1353.0 nmの励起光P_{A1}のパワーを増加させるか、または、ラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ長波長側に位置する1536.1 nmの励起光P_{B1}のパワーを減少させればよい。また、第1励起光のうちの複数の波長の励起光パワーが変化していることが判断された場合には、第2励起光のうちの複数の波長の励起光パワーを調整するのが好ましい。さらに、波長可変の励起光源を用いて第2励起光が生成されているときには、上記のような励起光パワーの制御だけでなく第2励起光の波長を最適化することで、より柔軟かつ高い精度の制御を行うことが可能になる。

【0059】

次に、本発明の第3実施形態について説明する。

図7は、第3実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図7において、本実施形態のラマン増幅器は、例えば、増幅媒体としての光ファイバ10を伝搬するWDM信号光をラマン増幅するための励起光を発生する多波長励起光源30と、その多波長励起光源30で発生する各波長の励起光パワーを制御する励起光パワー制御部31と、多波長励起光源30から出力される励起光を光ファイバ10に与える光サーキュレータ32と、光ファイバ10を伝搬し光サーキュレータ32を通過したWDM信号光を複数の波長帯に分波する分波器33と、各波長帯に分波された信号光の波長間のパワー偏差を各々の波長帯ごとに低減する利得等化器34₁、34₂、…、34_nと、各利得等化器34₁～34_nから出力される信号光を合波して出力する合波器35と、を備えて構成される。

【0060】

上述した第1実施形態の場合と同様の光ファイバ10を伝搬するWDM信号光は、例えば図8に示すように、ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に所要の波長間隔で配置された複数の信号光S₁～S_Nを含んでいる。

【0061】

多波長励起光源30は、図8に示すように、信号光S₁～S_Nの波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅程度だけ短波長側にシフトさせた帯域内に配置された波長の異なる複数の励起光P₁～P_Mを発生する。この多波長励起光源30で発生する各励起光P₁～P_Mのパワーは、後述するように信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるように励起光パワー制御部31によって制御されている。上記多波長励起光源30で発生する励起光P₁～P_Mは、上述した第1実施形態における第1励起光に相当するものである。ただし、ここでは励起光P₁～P_Mのうちの長波長側に位置する励起光が信号光波長帯域の一部に混在する波長配置が適用される。

【0062】

光サーキュレータ32は、多波長励起光源30からの励起光を光ファイバ10の信号光出力側の一端に与えると共に、光ファイバ10を伝搬してラマン増幅さ

れたWDM信号光を後段の分波器33に伝える。ここでは、光サーキュレータ32により光ファイバ10に与えられた励起光は、WDM信号光の伝搬方向とは逆方向に光ファイバ10内を伝搬することになる。

【0063】

分波器33は、光サーキュレータ32から伝えられるWDM信号光を複数の波長帯 B_1 , B_2 , ..., B_n に分波して各波長帯 $B_1 \sim B_n$ に対応したポートからそれぞれ出力する。上記の各波長帯 $B_1 \sim B_n$ は、後述するようにラマン利得の波長偏差が略同じになる範囲を1つの波長帯として予め設定したものである。分波器33の具体的な構成としては、例えば、複数の誘電体多層膜フィルタを多段接続した構成などを適用することが可能である。

【0064】

各利得等化器34₁~34_nは、分波器33の各波長帯 $B_1 \sim B_n$ に対応した出力ポートに接続され、各々の波長帯 $B_1 \sim B_n$ におけるラマン増幅の利得波長特性に対応した透過（または損失）波長特性を有し、分波器33で分波された各波長帯 $B_1 \sim B_n$ の信号光に発生した波長間の光パワー偏差を低減して平坦な信号光をそれぞれ生成する。各利得等化器34₁~34_nとしては、各々の波長帯 $B_1 \sim B_n$ としてラマン利得の波長偏差が同程度となる範囲が設定されているため、簡略な構成の周期性光フィルタを使用することが可能である。なお、各利得等化器34₁~34_nの具体的な構成例については後述する。

【0065】

合波器35は、各利得等化器34₁~34_nから出力される信号光が各波長帯 $B_1 \sim B_n$ に対応したポートに入力され、各々の波長帯 $B_1 \sim B_n$ の信号光を合波して1つのポートから出力する。この合波器35の具体的な構成としては、例えば、複数の誘電体多層膜フィルタを多段接続した構成などを適用することが可能である。

【0066】

次に、第3実施形態のラマン増幅器の作用について説明する。

ラマンシフト周波数の略2倍あるいはそれ以上の波長帯域を有するWDM信号光のラマン増幅を行う場合、上述の（3）や（4）の問題点において説明したよ

うに、その利得波長特性は非常に複雑な形状となるため、ラマン増幅された信号光の波長間のパワー偏差を低減する利得等化器は、その構成が複雑なものとなり損失が増大してシステム性能劣化の要因となってしまう。そこで、本実施形態のラマン増幅器は、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるように複数の励起光 $P_1 \sim P_M$ のパワーを制御し、かつ、ラマン利得の波長偏差が同程度となる複数の波長帯 $B_1 \sim B_n$ に応じてラマン増幅後の WDM 信号光を分波して個別に利得等化を行うことによって、各波長帯 $B_1 \sim B_n$ に対応した利得等化器として簡略な構成のものを使用可能にして損失の増大を抑えるようにしている。

【0067】

具体的に、多波長励起光源 30 から光サーキュレータ 32 を介して光ファイバ 10 に供給される励起光 $P_1 \sim P_M$ として、上述の表 1 に示した場合と同一の条件に設定した 13 波長の励起光 $P_1 \sim P_{13}$ を適用した場合の一例を挙げて、上記の内容を詳しく説明する。

【0068】

図 9 は、上記のような励起光 $P_1 \sim P_{13}$ を適用した場合の利得波長特性の計算例である。なお、図 9 中の細線で示す特性が利得等化前のラマン利得の波長特性であり、太線で示す特性が利得等化器の損失波長特性であり、極太線で示す特性が利得等化後のラマン利得の波長特性である。

【0069】

図 9 の具体例において、まず、利得等化前のラマン利得の波長特性（細線）に注目すると、信号光波長帯域（増幅帯域）のラマン利得の極小値が略同一のレベル L_{MIN} に制御されていることが分かる。そして、その利得波長特性については、隣り合う極小値と極大値の偏差が同程度となる 3 つの波長帯 B_1 , B_2 , B_3 を設定することができることも分かる。具体的に、ここでは波長帯 B_1 , B_2 の境界部分に 1334 ~ 1338 nm の波長範囲のガードバンド B_{G1} が設定され、波長帯 B_2 , B_3 の境界部分に 1511.3 ~ 1515.3 nm の波長範囲のガードバンド B_{G2} が設定されて、増幅帯域全体が 3 つの波長帯 $B_1 \sim B_3$ に区分されるようにしている。

【0070】

次に、利得等化器の損失波長特性（太線）に注目すると、ラマン利得の波長偏差が最も大きい波長帯 B_1 に対応した利得等化器 341 については、例えば、上述の図 37 に示した場合と同様にして、周期 3.76 THz、振幅 3.0 dB および中心周波数 230.4 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期 4.41 THz、振幅 1.2 dB および中心周波数 231.1 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタとを組み合わせた構成を適用することにより、波長帯 B_1 におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。また、波長帯 B_2 に対応した利得等化器 342 については、例えば、周期 4.55 THz、振幅 0.9 dB および中心周波数 222.3 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期 4.33 THz、振幅 1.0 dB および中心周波数 200.5 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタとを組み合わせた構成を適用することにより、波長帯 B_2 におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。さらに、波長帯 B_3 に対応した利得等化器 343 については、周期 4.4 THz、振幅 0.7 dB および中心周波数 187.2 THz の 1 種類の周期性フィルタを適用することにより、波長帯 B_3 におけるラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性を実現している。

【0071】

上記のように各々の波長帯 $B_1 \sim B_3$ ごとに損失波長特性が最適化された簡略な構成の利得等化器 341 ～ 343 を用いて利得等化を行うことにより、図 9 に示すように利得等化後の波長特性（極太線）は、3 つの波長帯 $B_1 \sim B_3$ すべてについて、ラマン利得の波長偏差が効果的に低減されており、かつ、10 dB 前後のラマン利得が確保されていることが分かる。

【0072】

従って、第 3 実施形態のラマン増幅器によれば、広帯域の信号光をラマン増幅する場合においても、簡略な構成の利得等化器 341 ～ 343 を用いて信号光波長帯域全体に亘る利得等化を確実に行うことができる。また、上記のような簡略な構成の利得等化器 341 ～ 343 は損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避することが可能に

なる。

【0073】

なお、図9の計算例に示した利得等化後の波長特性については、約2.8dBの利得偏差が残留しているが、例えば、各励起光の波長およびパワーのさらなる最適化を図り、また、上述した第1実施形態の構成を併用してラマン利得の極大値が等しい波長間隔で並ぶようにすることで、上記利得偏差の残留分を低減させることが可能である。図10は、第1および第3実施形態を併用した場合の具体的な構成例であり、図11は、図10の構成例における信号光および励起光の波長配置を例示したものである。

【0074】

また、上記の第3実施形態では、信号光波長帯域におけるラマン利得の極小値が略同一となるように励起光パワーを制御する構成について説明したが、本発明はこれに限らず、例えば、ラマン利得の極大値が略同一となるように励起光パワーを制御するようにしてもよい。ただし、極大値を基準にする場合には、各波長帯 $B_1 \sim B_n$ について利得等化後の信号光レベルを揃えるために、利得偏差が小さな波長帯についての利得等化器の損失を大きく設定する必要があるが生じる。このため、より低損失の利得等化を行うためには、極小値を略同一とするのが望ましい。

【0075】

次に、本発明の第4実施形態について説明する。

上記の第3実施形態では、ラマン増幅されたWDM信号光を複数の波長帯 $B_1 \sim B_n$ に分波して利得等化を行うようにした。第4実施形態では、利得等化の際の帯域分割を行わずに1台の利得等化器を使用して信号光波長帯域全体の一括利得等化を行うことができるようにした応用例について説明する。

【0076】

図12は、第4実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図12において、本実施形態のラマン増幅器の構成が第3実施形態の場合と異なる部分は、第3実施形態において用いられていた励起光パワー制御部31に代えて、信号光波長帯域におけるラマン増幅の利得波長特性の極大点および極小点

が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、多波長励起光源 30 で発生する励起光 $P_1 \sim P_M$ のパワーを制御する励起光パワー制御部 31' を設け、これにより利得等化の際の帯域分割を不要して 1 台の利得等化器 36 により信号光波長帯域全体の一括利得等化を行うようにした部分である。なお、本実施形態で用いられる多波長励起光源 30、光サーキュレータ 32 および光ファイバ 10、並びに、信号光 $S_1 \sim S_L$ および励起光 $P_1 \sim P_M$ の波長配置については第 3 実施形態の場合と同様である。ただし、光ファイバ 10 を伝搬する WDM 信号光については、ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に所要の波長間隔で配置された複数の信号光 $S_1 \sim S_N$ を含む場合に本実施形態の構成は有効となる。

【0077】

図 13 は、上記のラマン増幅器における利得等化前の利得波長特性の一例について信号光波長帯域（増幅帯域）部分を拡大して示した図である。この利得波長特性は、多波長励起光源 30 から出力される励起光 $P_1 \sim P_M$ として、上述の表 1 に示した場合と同一の条件に設定した 13 波長の励起光 $P_1 \sim P_{13}$ を適用した場合の計算例である。

【0078】

図 13 に示した計算例では、基準利得値が 12 dB に設定されており、12 dB を超える図で上方の領域が正の領域、12 dB 未満の図で下方の領域が負の領域とされる。そして、多波長励起光源 30 で発生する励起光 $P_1 \sim P_{13}$ のパワーが励起光パワー制御部 31' によって制御されることにより、信号光波長帯域（増幅帯域）におけるラマン利得の極大点および極小点が正の領域および負の領域に略均等に並んだ状態、すなわち、信号光波長帯域についてのラマン利得の平均値が基準利得値と略等しくなる状態が実現されている。次の表 4 に示すデータは、図 13 に示したラマン利得の極大値および極小値をまとめたものであり、図 14 は、表 4 の各データを横軸を波長、縦軸を利得としてプロットしたものである。

【0079】

【表 4】

極大波長 (nm)	極大周波数 (THz)	極大値 (dB)	極小波長 (nm)	極小周波数 (THz)	極小値 (dB)
1300.62	230.50	17.09	1309.71	228.90	8.02
1323.00	226.60	17.16	1335.97	224.40	9.46
1349.20	222.20	14.74	1362.07	220.10	9.45
1378.99	217.40	14.50	1392.44	215.30	10.41
1407.48	213.00	13.92	1422.17	210.80	9.64
1439.23	208.30	14.64	1450.37	206.70	10.02
1466.70	204.40	14.12	1480.46	202.50	9.52
1495.97	200.40	14.34	1513.34	198.10	11.02
1528.77	196.10	12.98	1547.72	193.70	11.00
1566.31	191.40	12.88	1584.53	189.20	11.56
1601.46	187.20	12.50	1621.38	184.90	11.34
1640.90	182.70	12.76	1658.14	180.80	11.64
1672.95	179.20	12.33			

【0080】

上記のような利得波長特性についても、前述の図 9 に示した場合と同様にして、隣り合う極小値と極大値の偏差が同程度となる 3 つの波長帯 B_1 、 B_2 、 B_3 を設定することができる（図 13）。ただし、本実施形態では、これらの波長帯 $B_1 \sim B_3$ ごとに利得等化が行われるのではなく、複数の周期性光フィルタを組み合わせた単一の利得等化器を用いて一括して利得等化が行われる。

【0081】

図 15 は、上記のようなラマン増幅の利得波長特性に対して適用される利得等化器 36 の損失波長特性および利得等化後の波長特性を求めた計算例である。

図 15 に示す利得等化器 36 の損失波長特性（太線）は、例えば、3 種類の周期性光フィルタから構成される。具体的には、周期 4.6 THz、振幅 0.92 dB および中心周波数 230.5 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期 4.2 THz、振幅 0.6 dB および中心周波数 230.5 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタと、周期 4.4 THz、振幅 1.9 dB および中心周波数 226.6 THz の損失波長特性を有する周期性光フィルタと、を組み合わせることで利得等化器 36 を構成することにより、信号光波長帯域の全体

に亘るラマン利得の波長偏差に対応した損失波長特性が実現される。このような利得等化器 3 6 を用いてラマン増幅後の WDM 信号光の一括利得等化を行うことにより、利得等化後の波長特性は、図 1 5 に極太線で示したように信号光波長帯域の全体について、ラマン利得の波長偏差が効果的に低減され、かつ、1 0 d B 前後のラマン利得が確保されるようになる。

【0 0 8 2】

従って、第 4 実施形態のラマン増幅器によれば、広帯域の信号光をラマン増幅する場合においても、簡略な構成の周期性光フィルタを組み合わせた 1 台の利得等化器 3 6 を用いて信号光波長帯域全体に亘る利得等化を確実に行うことができ、このような利得等化器 3 6 は損失が比較的小さいため、従来のように利得等化器がシステム性能劣化の要因となってしまうことを回避することが可能になる。

【0 0 8 3】

なお、図 1 5 の計算例に示した利得等化後の波長特性においても利得偏差が残留しているが、各励起光の波長およびパワーのさらなる最適化を行い、上述した第 1 実施形態の構成を併用してラマン利得の極大値が等しい波長間隔で並ぶようにすることで、上記利得偏差の残留分を低減させることが可能である。

【0 0 8 4】

次に、本発明の第 5 実施形態について説明する。

上述した第 1 ～第 4 実施形態において、信号光および励起光がある波長帯域内で混在するような波長配置が適用される場合、光ファイバ 1 0 に供給される励起光のレーリ散乱光が合波部 1 2（光サーキュレータ 3 2）を通過して WDM 信号光と共に後段側に伝わるようになる。このレーリ散乱光は WDM 信号光の波長帯域内にも存在するため WDM 信号光を伝送する過程で累積し、システム性能を劣化させる可能性がある。このようなレーリ散乱光による性能劣化を防ぐためには、レーリ散乱光を除去するための光フィルタの適用が有効であることを本出願人は提案している（例えば、特願 2 0 0 1 - 3 9 0 3 6 6 号参照）。そこで、第 5 実施形態では、上記のようなレーリ散乱光除去用の光フィルタを適用した改良例について説明する。

【0 0 8 5】

図 16 は、第 5 実施形態のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

図 16 において、本実施形態のラマン増幅器は、例えば、上述の図 7 に示した第 3 実施形態の構成について、光サーキュレータ 32 と分波器 33 の間にレーリ散乱光を除去するための光フィルタ 40 を設けたものである。

【0086】

光フィルタ 40 は、例えば図 17 に示すように、励起光 $P_1 \sim P_M$ の各中心波長に対応した波長で透過率が急峻に低下する周期性ノッチフィルタを用いることが可能である。

【0087】

上記のような構成のラマン増幅器では、多波長励起光源 30 から光サーキュレータ 32 を介して光ファイバ 10 に供給された励起光 $P_1 \sim P_M$ のレーリ散乱光が WDM 信号光 $S_1 \sim S_L$ と共に光サーキュレータ 32 を通過して光フィルタ 40 に入力される。光フィルタ 40 では、各励起光 $P_1 \sim P_M$ に一致した波長を持つレーリ散乱光の通過が阻止され、各励起光 $P_1 \sim P_M$ とは異なる波長に配置された WDM 信号光のみが分波器 33 に送られるようになる。これにより、励起光 $P_1 \sim P_M$ のレーリ散乱光が後段側に伝達されることがなくなるため、システム性能の改善を図ることが可能になる。

【0088】

さらに、励起光 $P_1 \sim P_M$ の周波数間隔が、ラマンシフト周波数の（整数 + 1 / 2）分の 1 に設定されている場合には、図 18 に示すように、分波器 33 の透過率が極小となる損失ピーク周波数（図 18 の上段）が、レーリ散乱光除去用の光フィルタ 40 の透過率が極小となる損失ピーク周波数（図 18 の下段）に一致するようになるため、ラマン増幅器の増幅帯域を有効に活用しつつ、レーリ散乱光の抑圧と波長帯 $B_1 \sim B_n$ ごとの利得等化を行うことが可能になる。

【0089】

なお、上記の第 5 実施形態では、図 7 に示した第 3 実施形態の構成についてレーリ散乱光除去用の光フィルタ 40 を設けた一例を示したが、第 3 実施形態以外の他の実施形態の構成についても同様にしてレーリ散乱光除去用の光フィルタを適用することが可能である。

【0090】

また、上記の第5実施形態の応用例として、レーリ散乱光除去用の光フィルタに利得等化の機能を具備させて、レーリ散乱光の除去と利得等化とを同一の光フィルタにより行うようにすることも可能である。図19は、上記のような光フィルタの透過波長特性の要部を拡大して示した図である。図19に示すように、励起光の中心波長に対応する波長で透過率が急峻に低下し、その前後に位置する信号光帯域ではラマン利得の波長特性に対応した形状で透過率が変化するような特性を持つ光フィルタが実現されれば、上記のようなレーリ散乱光除去および利得等化の一括処理を行うことができる。

【0091】

さらに、上記の第5実施形態の他の応用例として、図20の要部構成に示すように、励起光近傍の波長域のみを透過する特性を備えた光フィルタ41を用いて、多波長励起光源30から出力される励起光 $P_1 \sim P_M$ を光ファイバ10（増幅媒体）に与えるようにすることも有効である。図21は、上記のような光フィルタ41についての波長に対する反射率の変化の好ましい具体例を示したものである。図21に示したような波長特性を有する光フィルタ41を用いれば、多波長励起光源30から光フィルタ10に与えられる各励起光 $P_1 \sim P_M$ のスペクトルを狭窄化することができ、また、各励起光 $P_1 \sim P_M$ の中心波長の間位置する波長域の反射特性がラマン利得のプロファイルと逆の特性となっているため、ラマン増幅された信号光 $S_1 \sim S_N$ の利得等化も同時に行うことができる。さらに、光ファイバ10内で発生したレーリ散乱光は、再び光フィルタ41を通過した後段側には伝えられないため、光フィルタ41によってレーリ散乱光を除去することもできる。従って、励起光スペクトルの狭窄化によるシステム性能の改善と同時に、ラマン増幅器の構成の簡略化および低損失化とを実現することが可能になる。

【0092】

次に、本発明の第6実施形態について説明する。

図22は、本発明の第6実施形態による光伝送システムの構成を示すブロック図である。

【 0 0 9 3 】

図 2 2 において、本光伝送システムは、例えば、光送信局 5 0 および光受信局 5 1 の間を接続する光伝送路 5 2 上に複数の光中継局 5 3 が配置され、光送信局 5 0 から光伝送路 5 2 に送出された WDM 信号光を各光中継局 5 3 で増幅しながら光受信局 5 1 まで中継伝送するシステムについて、各々の光中継局 5 3 が上述した第 1 ～第 5 実施形態のうちのいずれかのラマン増幅器を含んで構成されたものである。ここでは、各光中継局 5 3 の間を繋ぐ光伝送路がラマン増幅用の増幅媒体として利用される。

【 0 0 9 4 】

光送信局 5 0 は、複数の光送信器 (E/O) 5 0 A で発生する波長の異なる信号光を合波器 5 0 B で合波して WDM 信号光を生成し、その WDM 信号光をポストアンプ 5 0 C で所要のレベルまで増幅して光伝送路 5 2 の送出する。また、光受信局 5 1 は、光送信局 5 0 から光伝送路 5 2 および各光中継局 5 3 を介して中継伝送された WDM 信号光をプリアンプ 5 1 A で所要のレベルまで増幅した後に分波器 5 1 B で各波長の信号光に分波し、各々の波長に対応した光受信器 (O/E) で信号光の受信処理を行う。

【 0 0 9 5 】

上記のような光伝送システムでは、光送信局 5 0 から光伝送路 5 2 に送信された WDM 信号光が各中継区間の光伝送路 5 2 を伝搬してラマン増幅されながら光受信局まで中継伝送される。このとき、各中継区間におけるラマン利得の波長特性に応じて WDM 信号光に生じる波長間のパワー偏差は簡略な構成で低損失の利得等化器によって等化されるようになるため、優れたシステム性能を実現することが可能になる。

【 0 0 9 6 】

なお、上記第 6 実施形態の光伝送システムについては、例えば図 2 3 に示すように、各中継区間で等化しきれずに残留した利得偏差の累積分を所要の中継数ごとにまとめて補償する利得等化器 5 4 を、各光中継局 5 3 のラマン増幅器内の利得等化器とは別に設けるようにしてもよい。これにより、システム性能のさらなる向上を図ることが可能になる。

【0097】

以上、本明細書で開示した主な発明について以下にまとめる。

【0098】

(付記1) 波長の異なる複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第1励起光発生部と、

該第1励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された1波長以上の励起光を発生する第2励起光発生部と、

前記第1および第2励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記増幅媒体に供給する合波部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0099】

(付記2) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器を備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0100】

(付記3) 付記1に記載のラマン増幅器であって、

前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光パワーの波長特性をモニタするモニタ部と、

該モニタ部のモニタ結果を基に判断される信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の変化に応じて、前記第2励起光発生部で発生する励起光の波長およびパワーの少なくとも一方を制御する制御部と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 1】

(付記 4) 付記 1 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域がラマンシフト周波数に対応した波長幅よりも狭く、信号光波長帯域および励起光波長帯域が分かれた波長配置が適用されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 2】

(付記 5) 付記 1 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域がラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長幅であり、励起光が信号光波長帯域内に混在する波長配置が適用されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 3】

(付記 6) 付記 5 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 4】

(付記 7) 付記 5 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 5】

(付記 8) 付記 5 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、励起光のスペクトルを狭窄化する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 0 6】

(付記 9) 付記 1 に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 0 7】

(付記 1 0) 付記 9 に記載の光伝送システムであって、

前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 0 8】

(付記 1 1) 付記 1 0 に記載の光伝送システムであって、

各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区間ごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 0 9】

(付記 1 2) ラマンシフト周波数の略 2 倍あるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極小値および極大値のいずれかが略同一となるように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

前記増幅媒体を伝搬してラマン増幅された波長多重信号光を、ラマン利得の波長偏差に応じて予め設定した複数の波長帯に分波する分波器と、

該分波器で分波された波長多重信号光のパワーの波長偏差を前記波長帯ごとに低減する複数の利得等化器と、

該各利得等化器から出力される信号光を合波する合波器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 0】

(付記 1 3) 付記 1 2 に記載のラマン増幅器であって、

前記複数の波長帯は、信号光波長帯域におけるラマン利得の波長偏差が略同じ

になる範囲を 1 つの波長帯としたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 1】

(付記 1 4) 付記 1 2 に記載のラマン増幅器であって、

前記励起光源は、信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第 1 励起光発生部と、

該第 1 励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された 1 波長以上の励起光を発生する第 2 励起光発生部と、

前記第 1 および第 2 励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記光サーキュレータに送る合波器と、を有することを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 2】

(付記 1 5) 付記 1 2 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 3】

(付記 1 6) 付記 1 5 に記載のラマン増幅器であって、

前記複数の波長帯の境界に設定された前記分波器のガードバンドの中心波長と、励起光の中心波長に対応させて設定された前記光フィルタの損失ピーク波長とを一致させたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 4】

(付記 1 7) 付記 1 2 に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 1 5】

(付記 1 8) 付記 1 7 に記載の光伝送システムであって、

前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 1 6】

(付記 19) 付記 18 に記載の光伝送システムであって、

各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区間ごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

【0117】

(付記 20) ラマンシフト周波数と略同じかあるいはそれ以上に対応した波長帯域内に配置される複数の信号光を合波した波長多重信号光が伝搬する増幅媒体に励起光を供給してラマン効果により波長多重信号光を増幅するラマン増幅器であって、

前記複数の信号光が配置された信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に配置された複数の励起光を発生する励起光源と、

信号光波長帯域におけるラマン利得の波長特性の極大点および極小点が、予め設定した基準利得値を境界とする正の領域および負の領域に略均等に並ぶように、前記励起光源で発生する励起光のパワーを制御する励起光パワー制御部と、

前記励起光源で発生する励起光を前記増幅媒体に供給する光サーキュレータと

、
信号光波長帯域の全体に亘って波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減する利得等化器と、を備えて構成されたことを特徴とするラマン増幅器。

【0118】

(付記 21) 付記 20 に記載のラマン増幅器であって、

前記励起光源は、信号光波長帯域をラマンシフト周波数に対応した波長幅に従って短波長側にシフトした帯域内に等しい波長間隔で配置された複数の励起光を発生する第 1 励起光発生部と、

該第 1 励起光発生部で発生する励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の少なくとも一方の側の波長帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された 1 波長以上の励起光を発生する第 2 励起光発生部と、

前記第 1 および第 2 励起光発生部でそれぞれ発生する励起光を合波して前記光サーキュレータに送る合波器と、を有することを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 1 9】

(付記 2 2) 付記 2 0 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 2 0】

(付記 2 3) 付記 2 0 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、信号光波長帯域内に混在する励起光のレーリ散乱光を除去する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 2 1】

(付記 2 4) 付記 2 0 に記載のラマン増幅器であって、

信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔に対応した周期性を有し、ラマン利得の波長偏差を低減すると同時に、励起光のスペクトルを狭窄化する光フィルタを備えたことを特徴とするラマン増幅器。

【0 1 2 2】

(付記 2 5) 付記 2 0 に記載のラマン増幅器を備えて構成されたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 2 3】

(付記 2 6) 付記 2 5 に記載の光伝送システムであって、

前記ラマン増幅器が、光端局間を接続する光伝送路上に配置された複数の光中継局にそれぞれ設けられたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 2 4】

(付記 2 7) 付記 2 6 に記載の光伝送システムであって、

各中継区間で利得等化されずに残留したラマン利得の波長偏差を複数の中継区間ごとに補償する利得等化器を備えたことを特徴とする光伝送システム。

【0 1 2 5】**【発明の効果】**

以上説明したように、本発明のラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システ

ムによれば、簡略な構成で低損失の利得等化器を利用して、ラマン増幅された波長多重信号光のパワーの波長偏差を低減することができるため、システム性能の改善を図ることが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 2】 第 1 実施形態における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図 3】 第 1 実施形態における多波長励起光源の具体的な構成例を示すブロック図である。

【図 4】 第 1 実施形態における利得等化器の透過波長特性の一例を示す図である。

【図 5】 第 1 実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図 6】 本発明の第 2 実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 7】 本発明の第 3 実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 8】 第 3 実施形態における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図 9】 第 3 実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図 1 0】 第 1 および第 3 実施形態を併用した場合の具体的な構成を示すブロック図である。

【図 1 1】 図 1 0 の構成における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図 1 2】 本発明の第 4 実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 1 3】 第 4 実施形態における利得等化前のラマン利得の波長特性を示す

図である。

【図 1 4】 図 1 3 におけるラマン利得の極大値および極小値の分布を示す図である。

【図 1 5】 第 4 実施形態により実現される利得波長特性の具体例を示す図である。

【図 1 6】 本発明の第 5 実施形態によるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図 1 7】 第 5 実施形態においてレーリ散乱光を除去するための光フィルタの透過波長特性の一例を示す図である。

【図 1 8】 第 5 実施形態における分波器および光フィルタの好ましい透過波長特性の一例を示す図である。

【図 1 9】 第 5 実施形態の応用例においてレーリ散乱光の除去および利得等化の機能を具備した光フィルタの透過波長特性を示す図である。

【図 2 0】 第 5 実施形態の他の応用例の要部構成を示すブロック図である。

【図 2 1】 図 2 0 における光フィルタの反射率の波長特性を示す図である。

【図 2 2】 本発明の第 6 実施形態による光伝送システムの構成を示すブロック図である。

【図 2 3】 第 6 実施形態に関連した他の構成例を示すブロック図である。

【図 2 4】 従来のラマン増幅器の構成例を示す図である。

【図 2 5】 図 2 4 のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図 2 6】 図 2 4 のラマン増幅器に対して利得等化器を適用した構成例を示す図である。

【図 2 7】 従来のラマン増幅器の他の構成例を示す図である。

【図 2 8】 図 2 7 のラマン増幅器における信号光および励起光の波長配置を示す図である。

【図 2 9】 励起光間に生じるラマン増幅の効率を低くする励起光の変調方式を説明するための図である。

【図 3 0】 複数の励起光を用いて得られるラマン利得の波長特性を説明する

ための図である。

【図 3 1】 不等間隔の励起光を用いたときに得られるラマン利得のプロファイルと、それに対応した利得等化器の損失波長特性を示す図である。

【図 3 2】 単一の波長の励起光を信号光波長帯域内に配置した一例を示す図である。

【図 3 3】 図 3 2 の波長配置において得られるラマン利得の波長特性を示す図である。

【図 3 4】 ラマンシフト周波数の約 4 倍となる増幅帯域幅を有するラマン増幅器について計算した利得波長特性の一例を示す図である。

【図 3 5】 図 3 4 におけるラマン利得の極大値および極小値の分布を示す図である。

【図 3 6】 図 3 4 の利得波長特性のうちの増幅帯域部分を拡大した図である。

【図 3 7】 図 3 6 利得波長特性に対して周期的な損失特性を有する光フィルタを適用して利得等化を行った場合の一例を示す図である。

【符号の説明】

- 1 0 光ファイバ
- 1 1, 3 0 多波長励起光源
- 1 2 合波部
- 1 3, 3 4₁ ~ 3 4_n, 3 6, 5 4 利得等化器
- 1 4 光カップラ
- 1 5 モニタ部
- 1 6 制御部
- 2 0 第 1 励起光発生部
- 2 1 第 2 励起光発生部
- 2 2, 3 5 合波器
- 3 1 励起光パワー制御部
- 3 2 光サーキュレータ
- 3 3 分波器

4 0 , 4 1 光フィルタ

5 0 光送信局

5 1 光受信局

5 2 光伝送路

5 3 光中継局

S 1 ~ S L 信号光

P 1 ~ P K 第 1 励起光

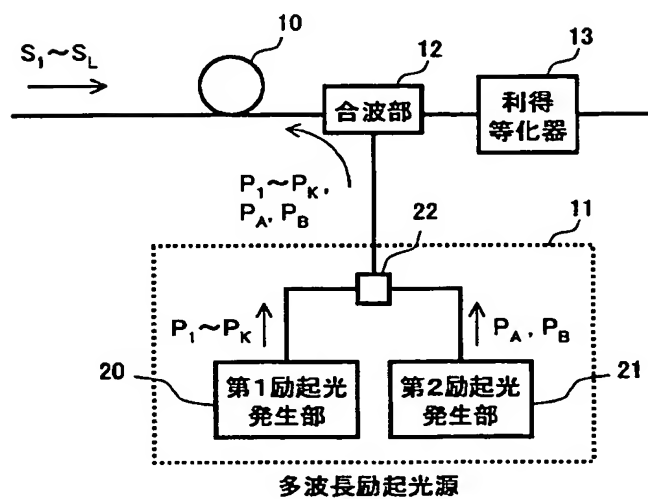
P A , P B 第 2 励起光

【書類名】

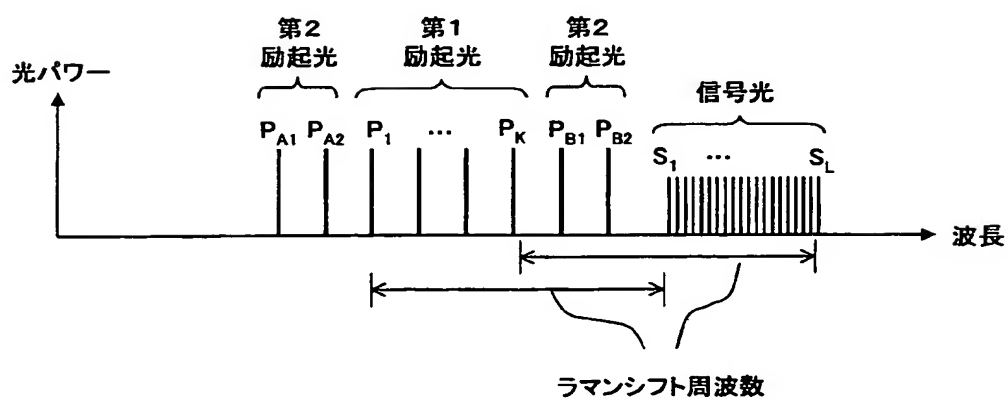
図面

【図 1】

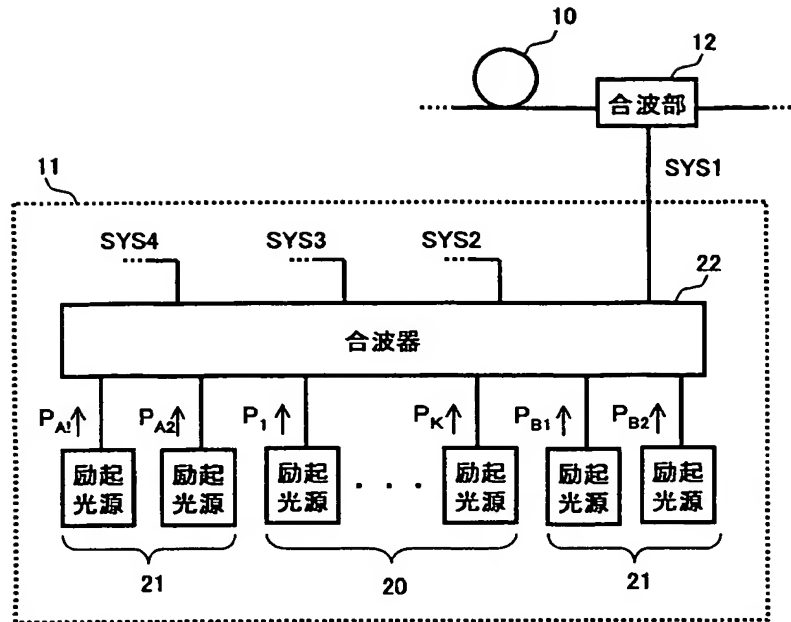
本発明の第1実施形態のラマン増幅器



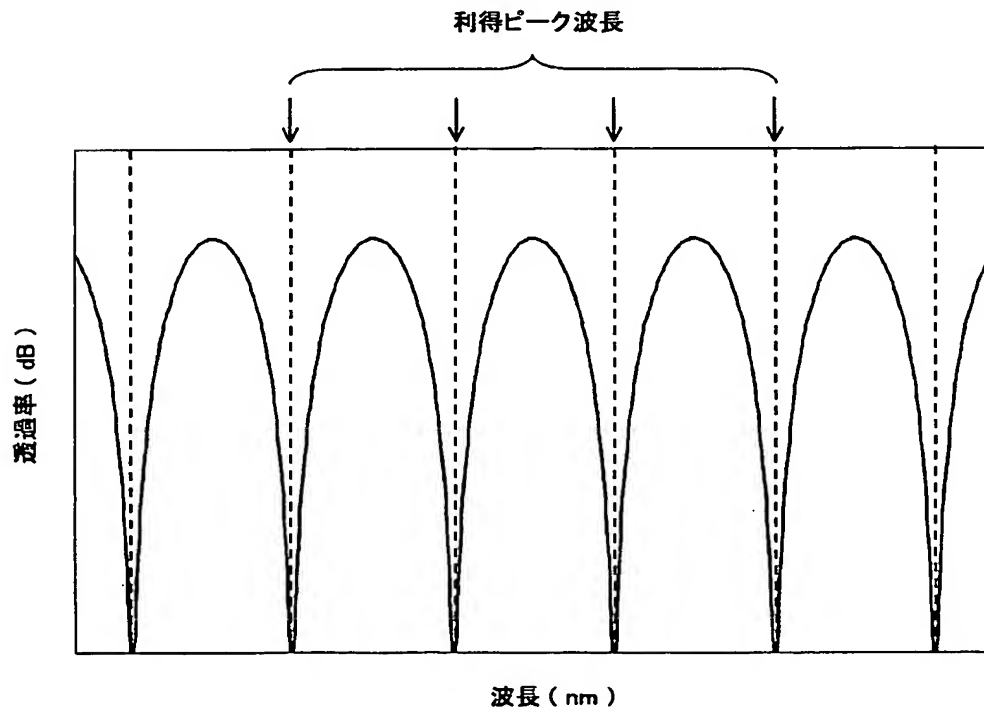
【図 2】



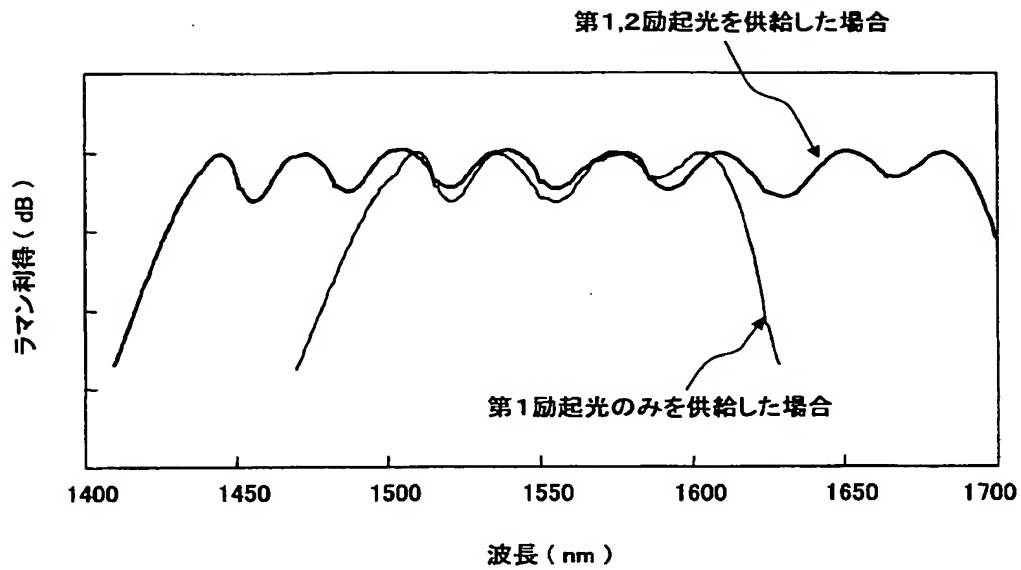
【図 3】



【図 4】

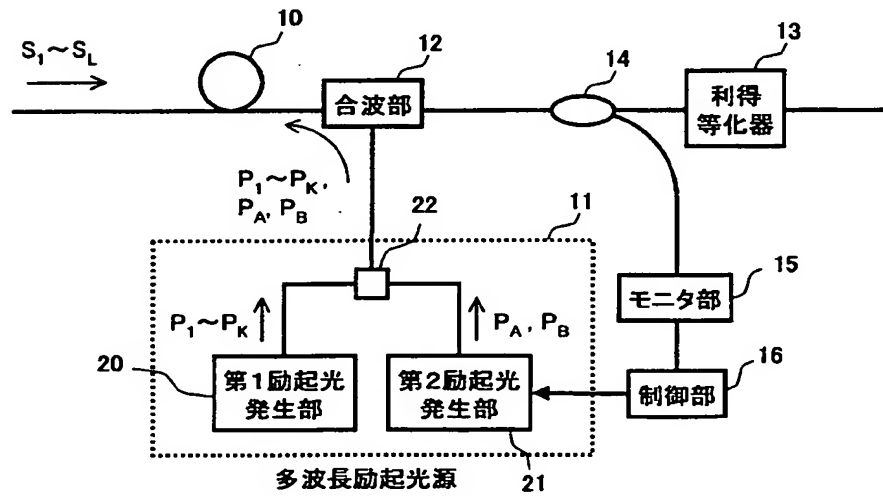


【図 5】



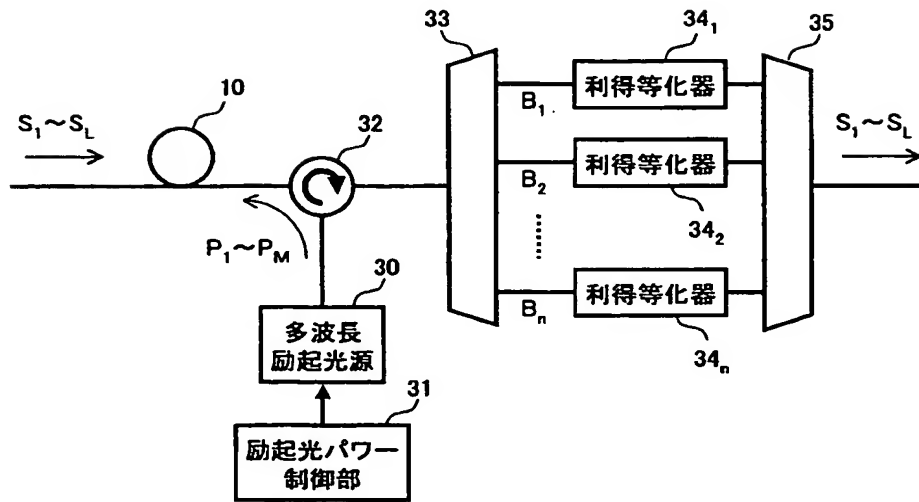
【図 6】

本発明の第2実施形態のラマン増幅器

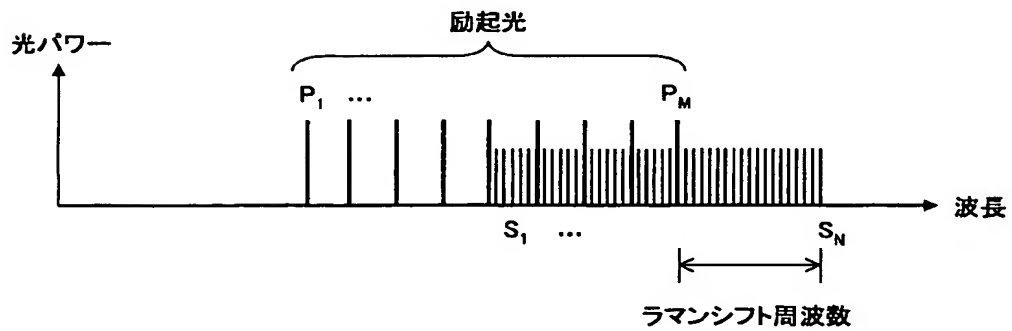


【図 7】

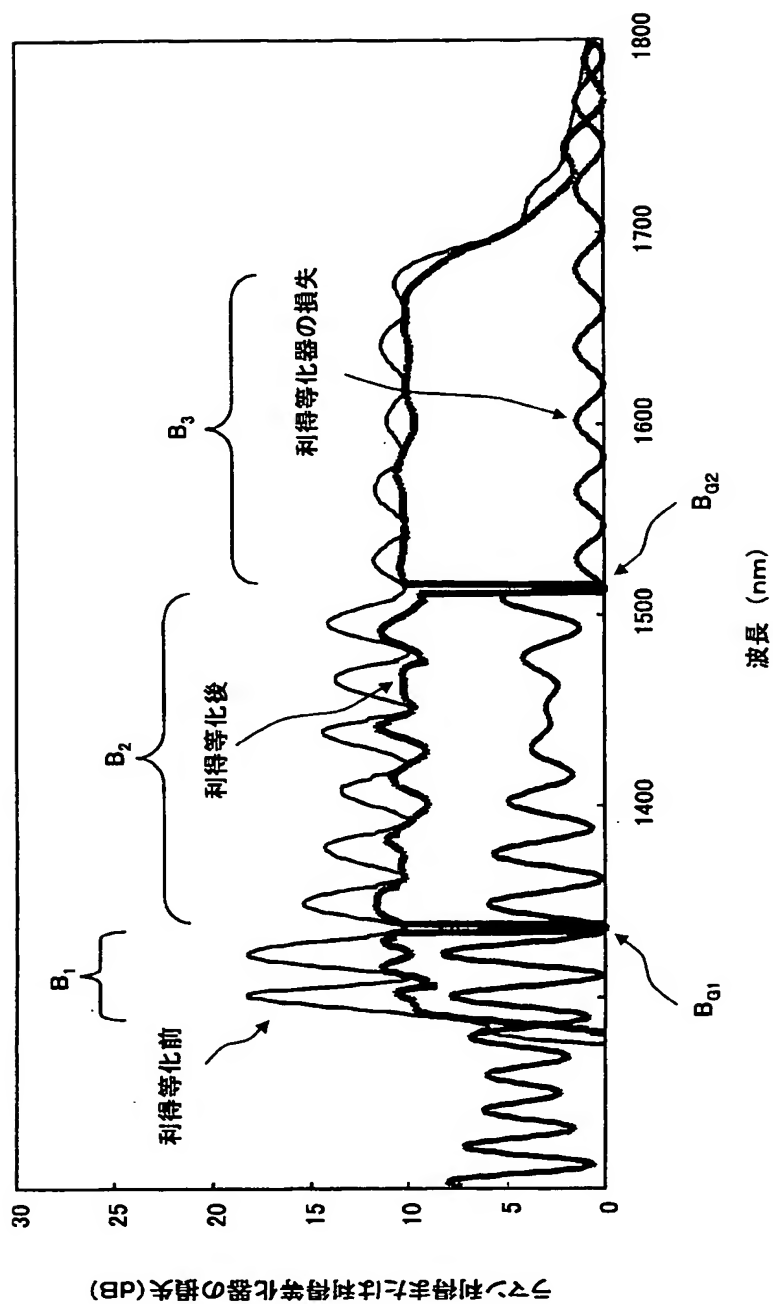
本発明の第3実施形態のラマン増幅器



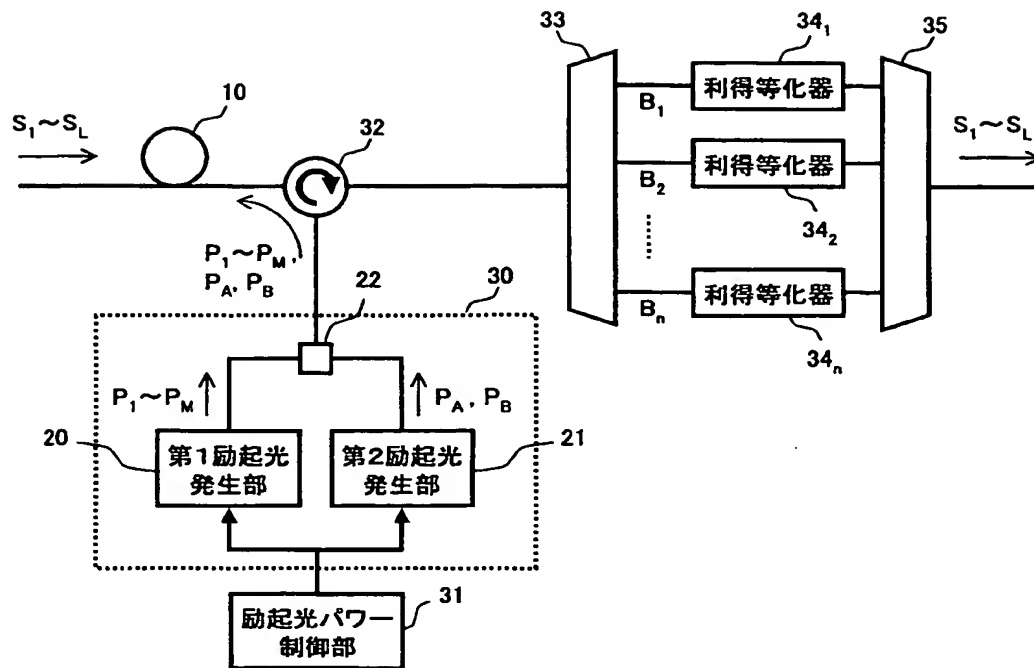
【図 8】



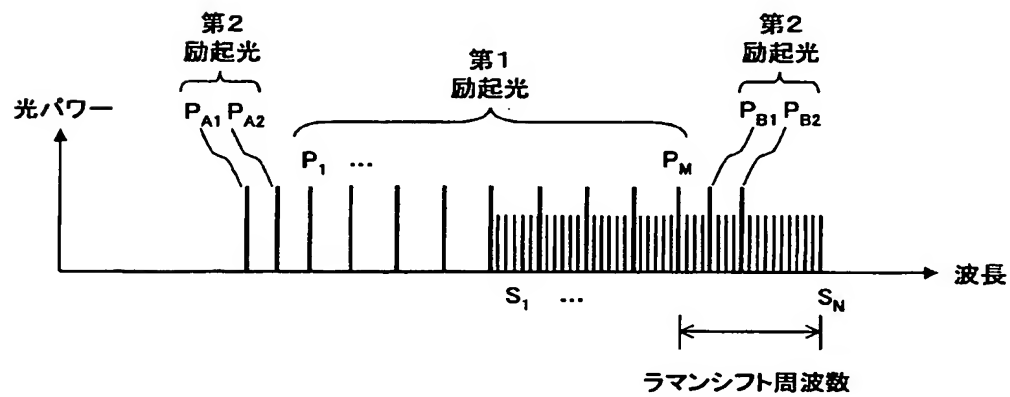
【図 9】



【図 10】

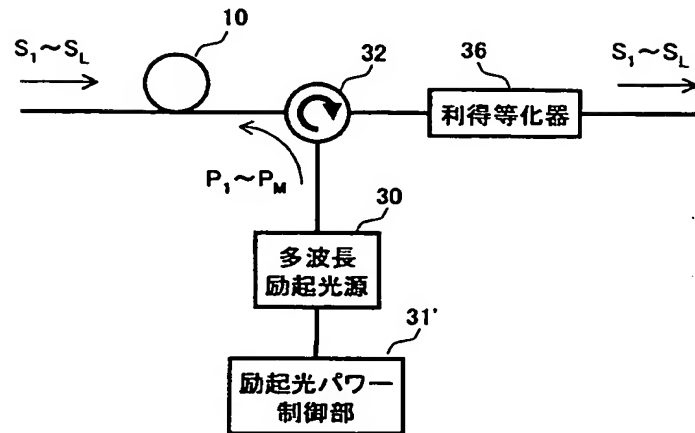


【図 11】

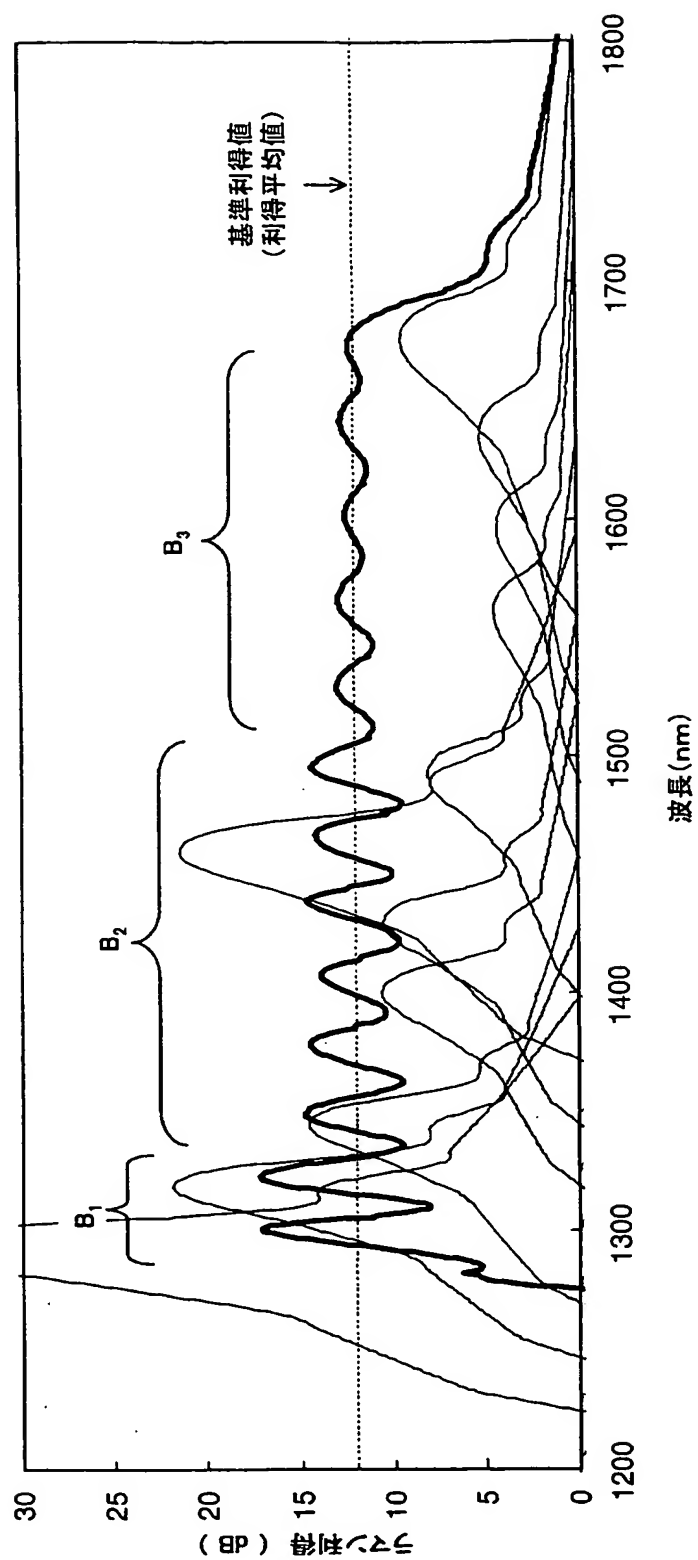


【図 12】

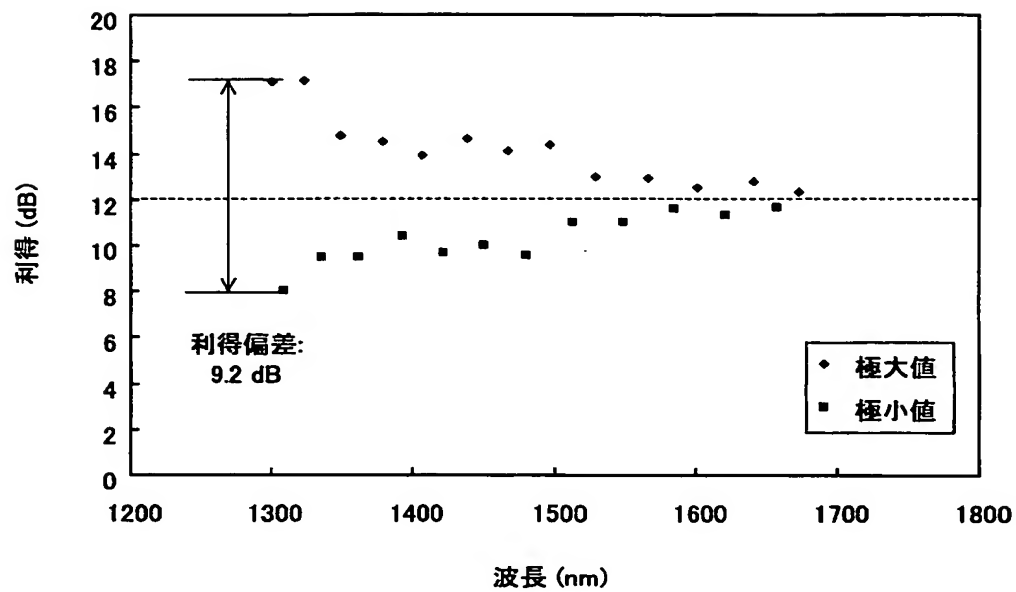
本発明の第4実施形態のラマン増幅器



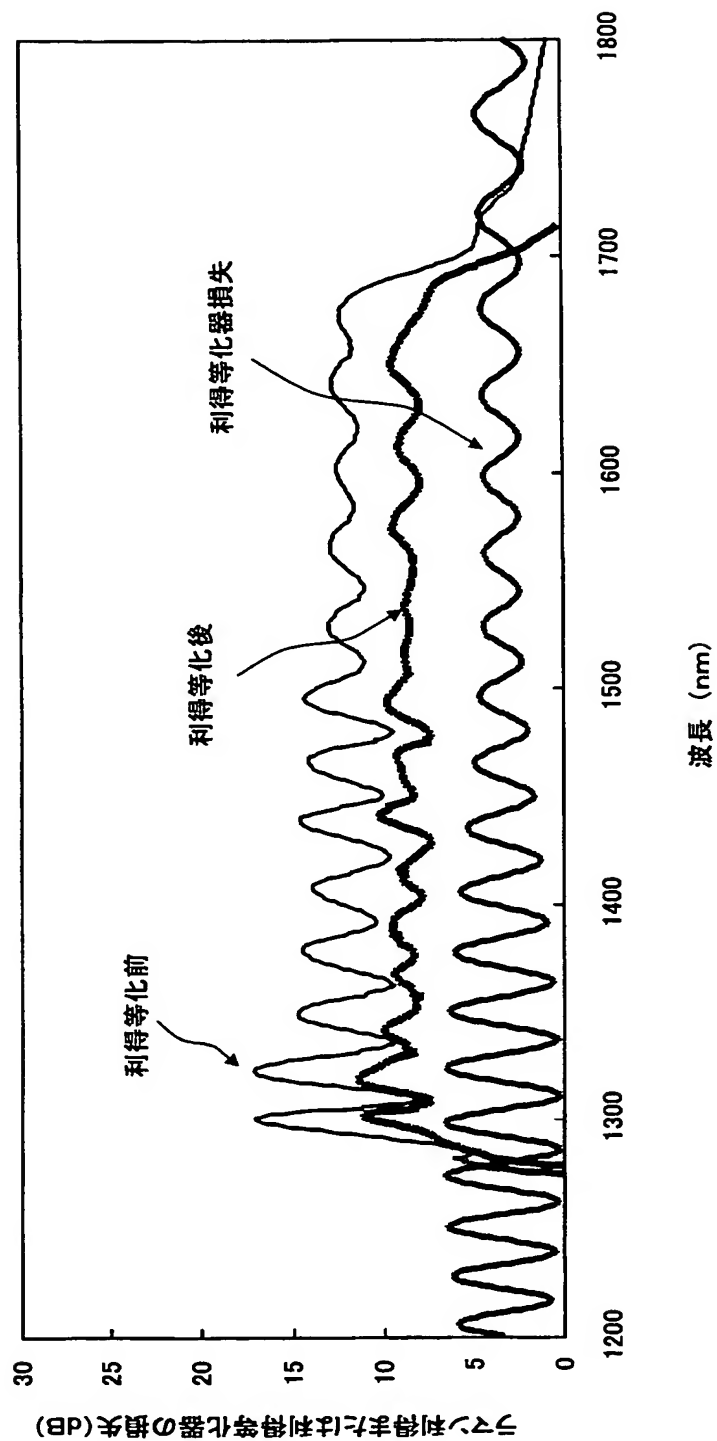
【図 13】



【図 14】

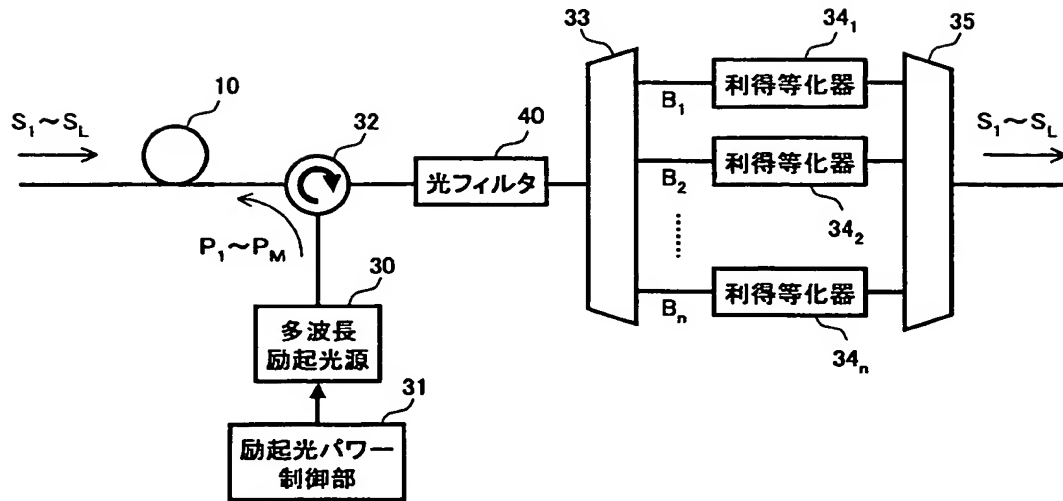


【図 15】

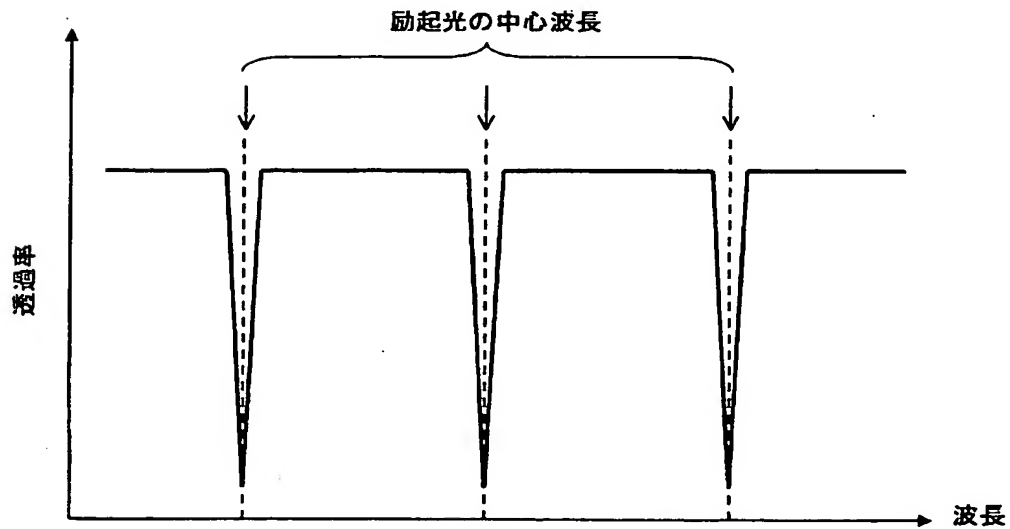


【図 16】

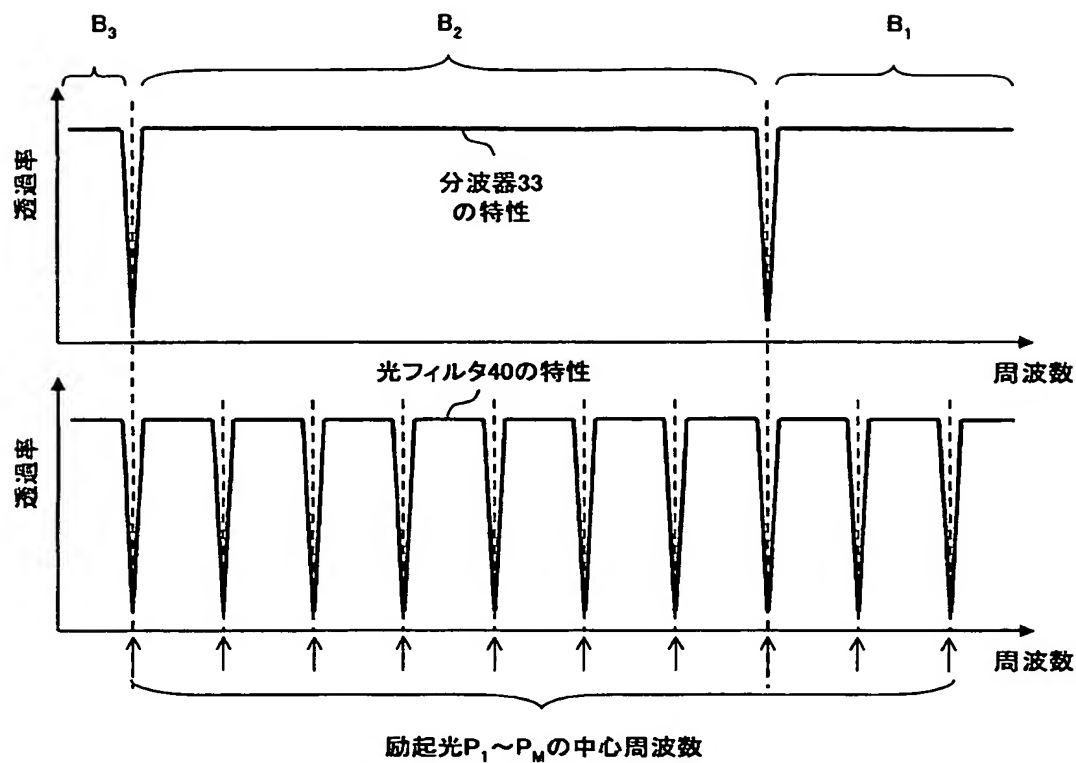
本発明の第5実施形態のラマン増幅器



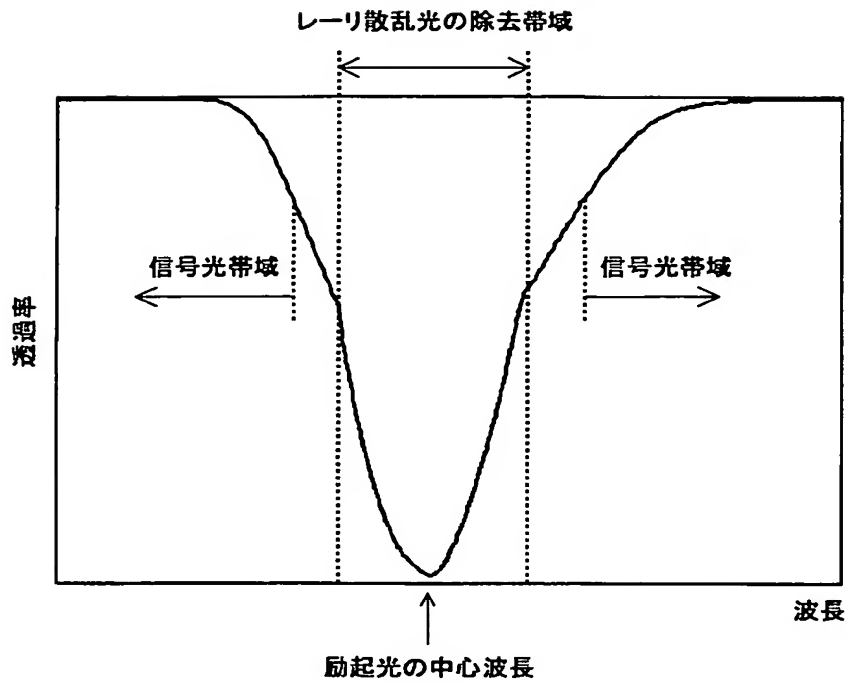
【図 17】



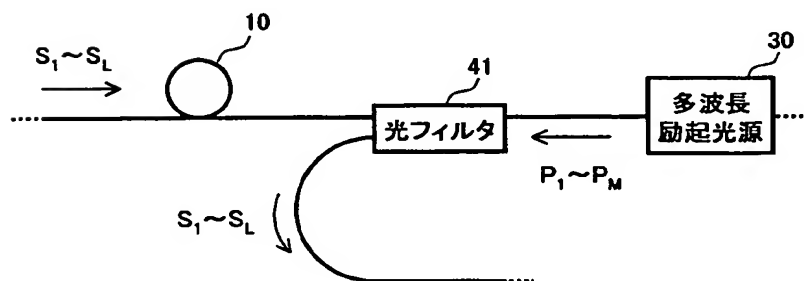
【図 18】



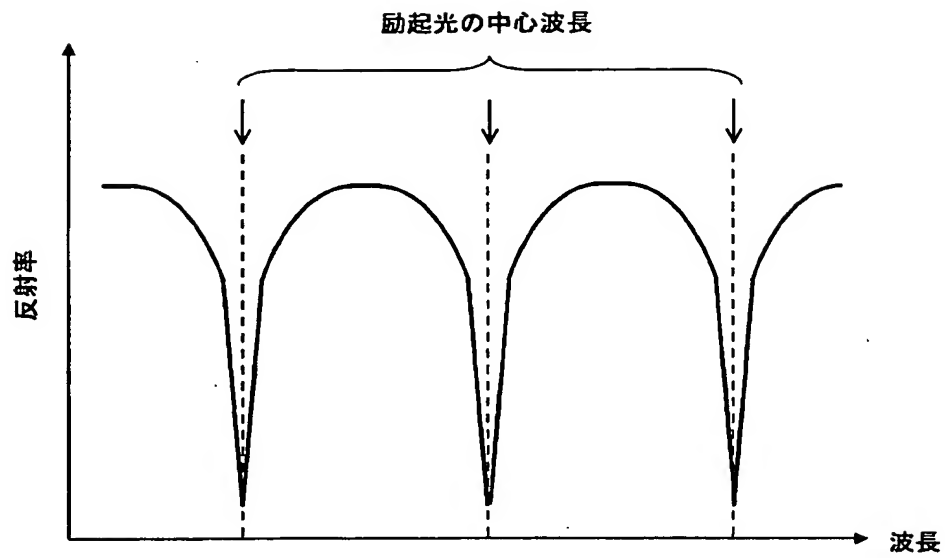
【図 19】



【図 20】

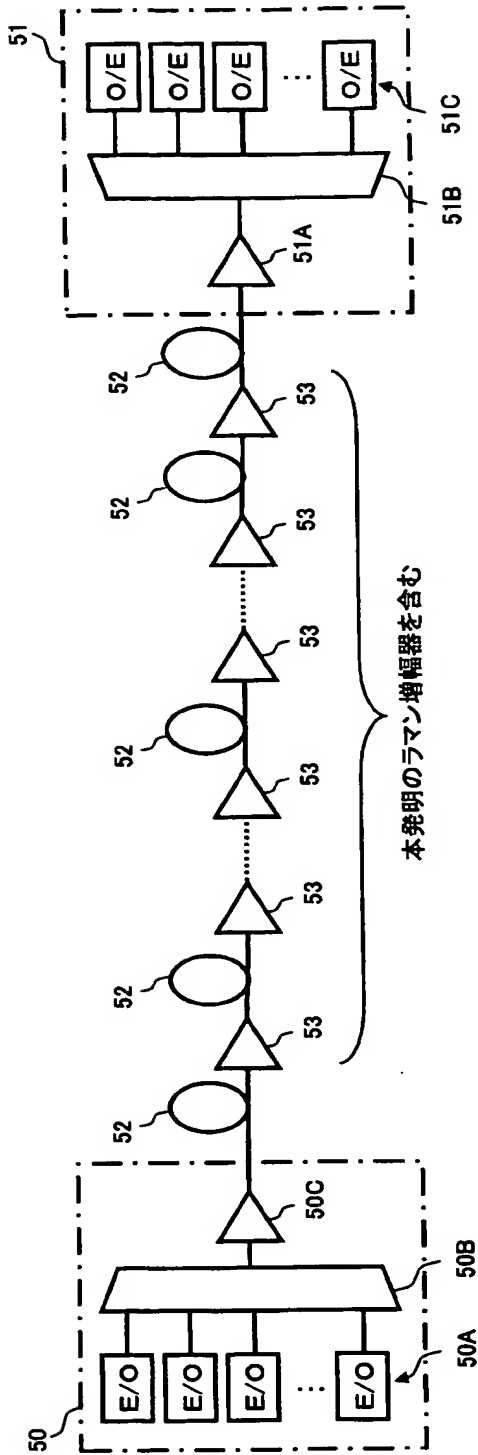


【図 21】

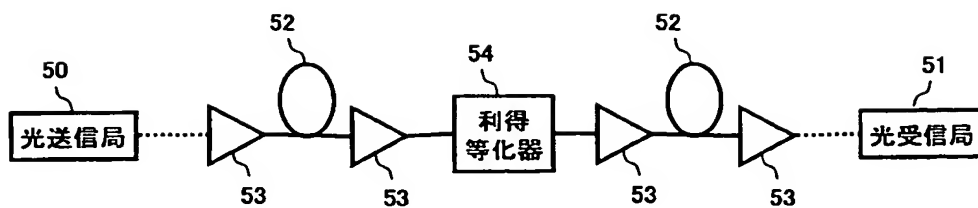


【図 22】

本発明の第6実施形態による光伝送システム

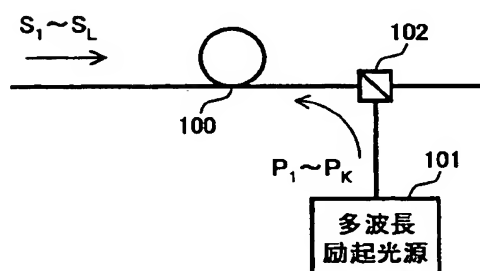


【図 23】



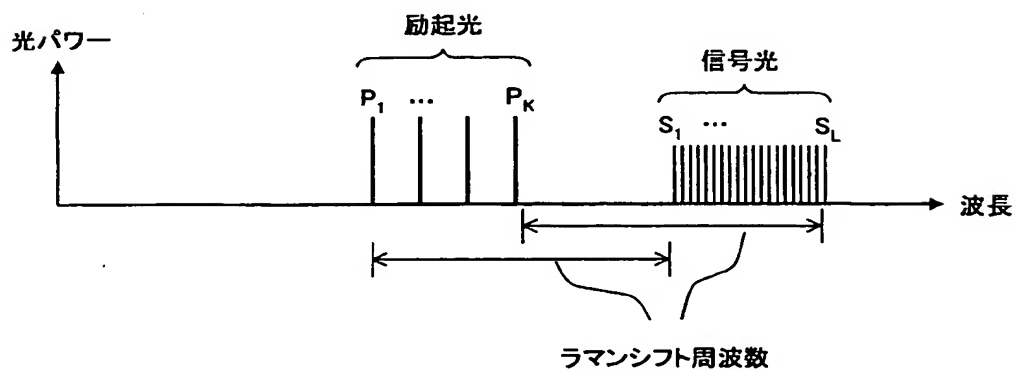
【図 24】

従来のラマン増幅器の構成例



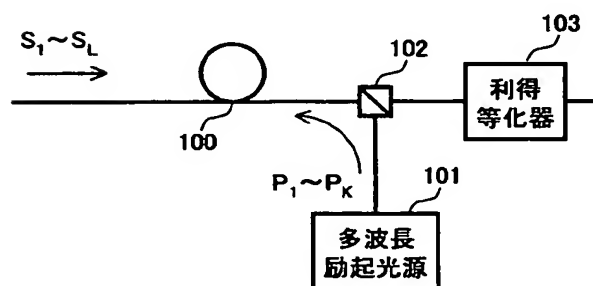
【図 25】

従来のラマン増幅器における波長配置例



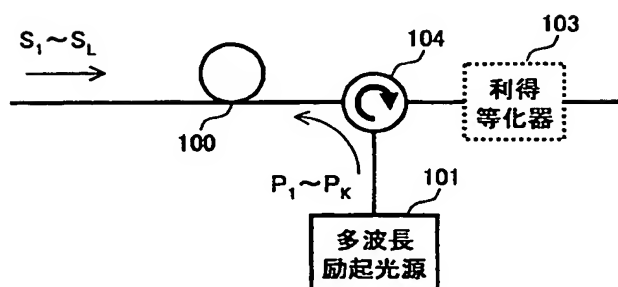
【図 26】

従来のラマン増幅器の他の構成例



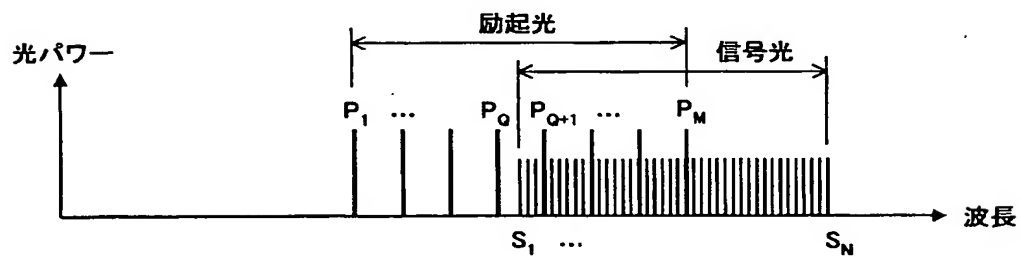
【図 27】

従来のラマン増幅器の他の構成例



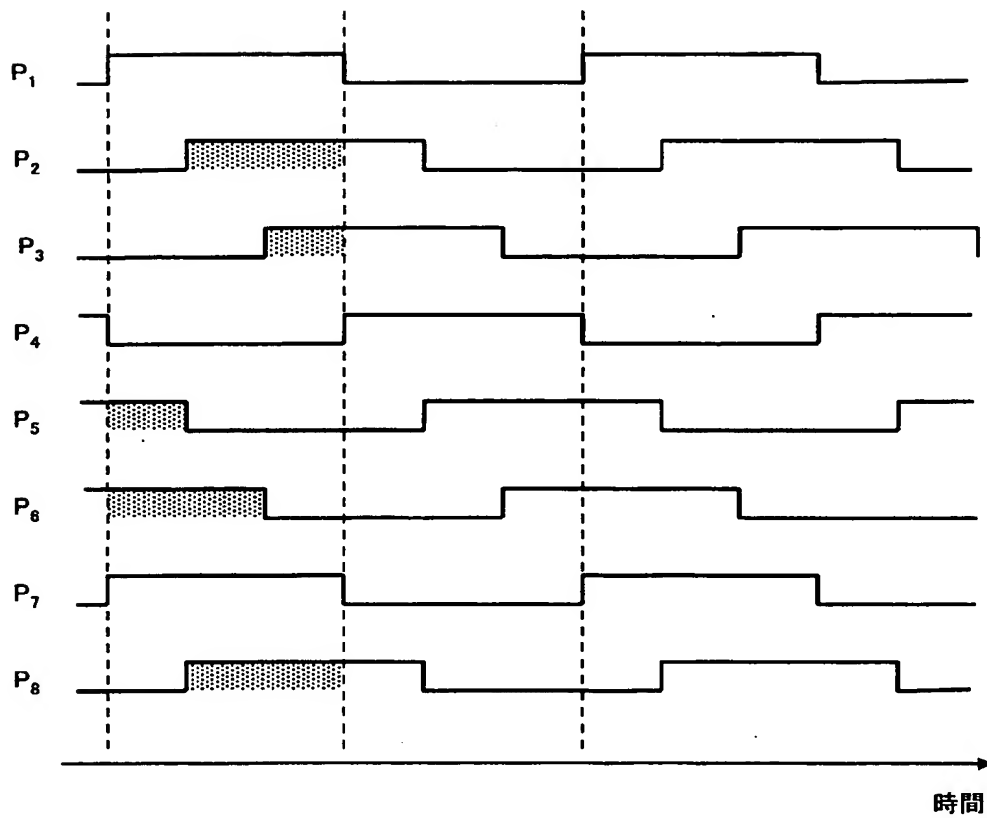
【図 28】

従来のラマン増幅器における他の波長配置例

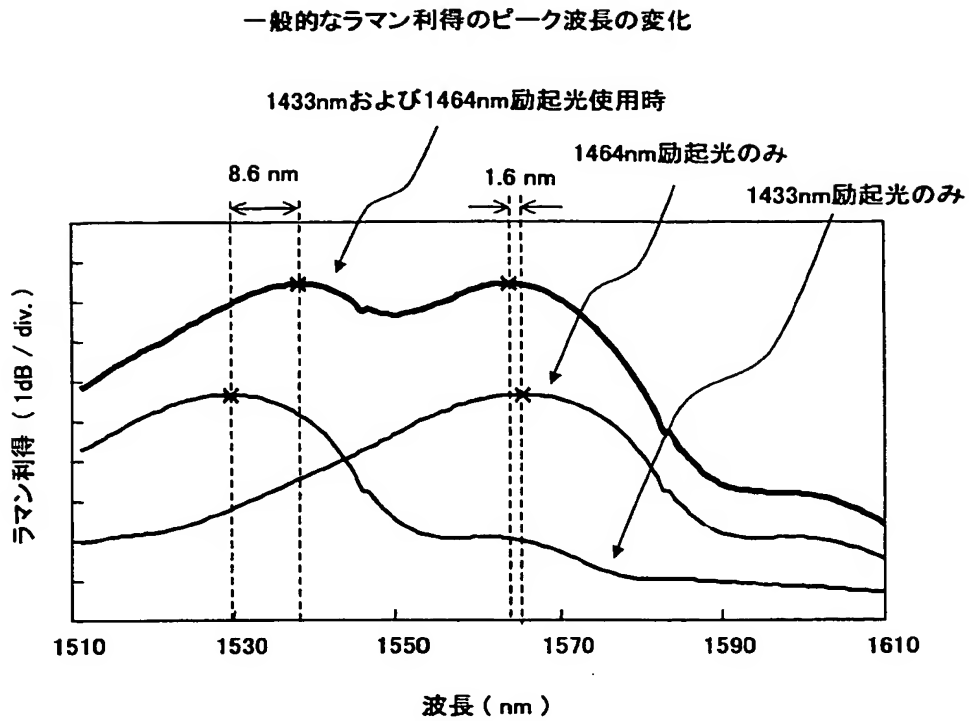


【図 29】

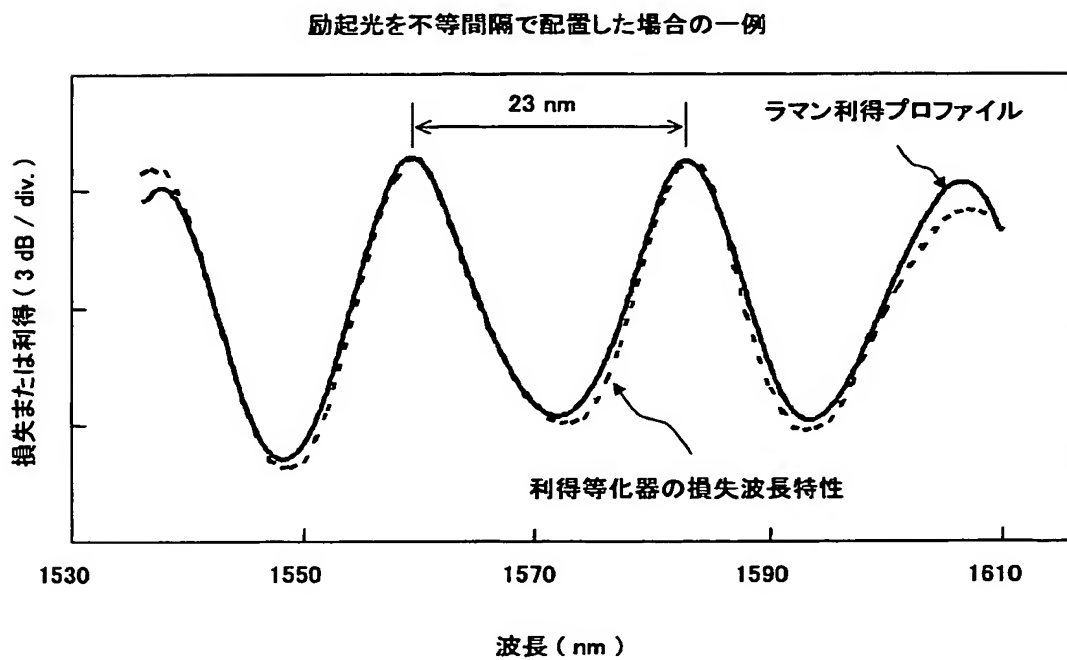
励起光の変調方式の一例



【図 30】

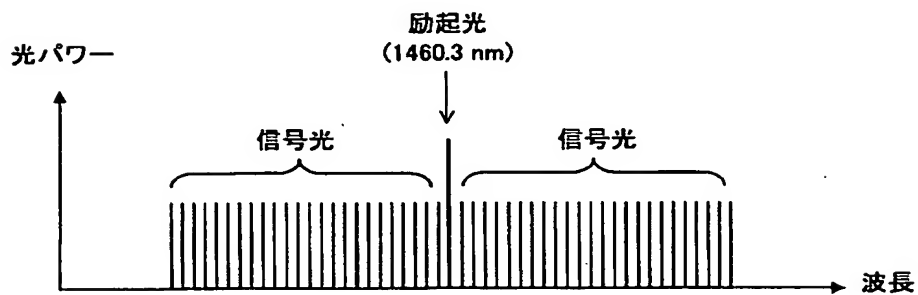


【図 31】



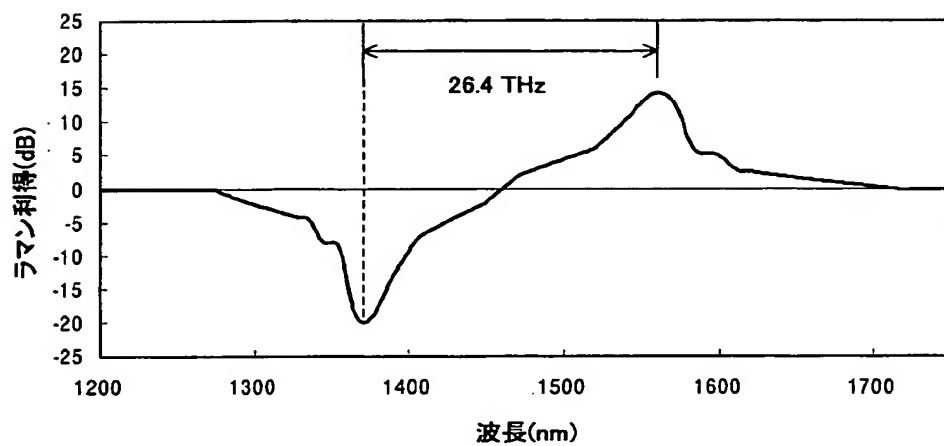
【図 3 2】

単一の励起光が信号光帯域内に混在する波長配置の一例



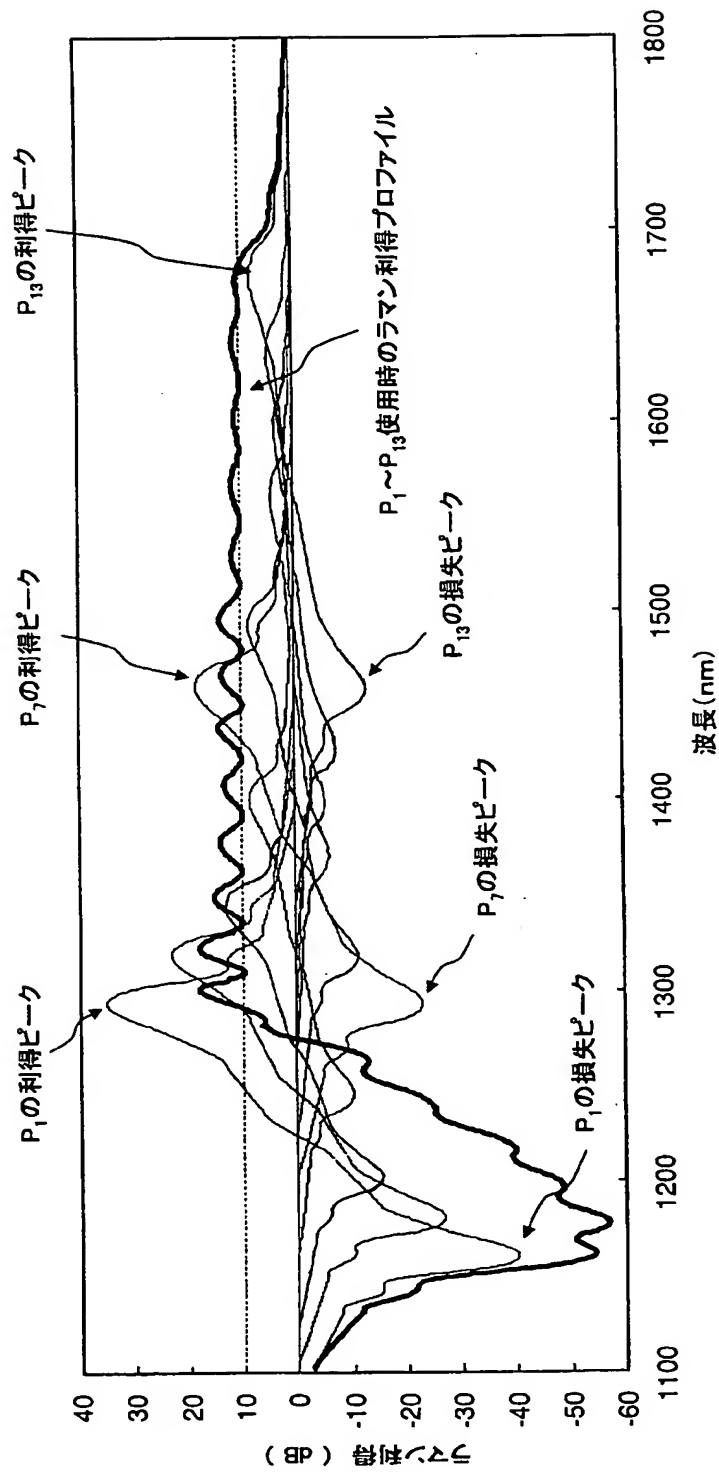
【図 3 3】

1460.3 nmの励起光によるラマン効果



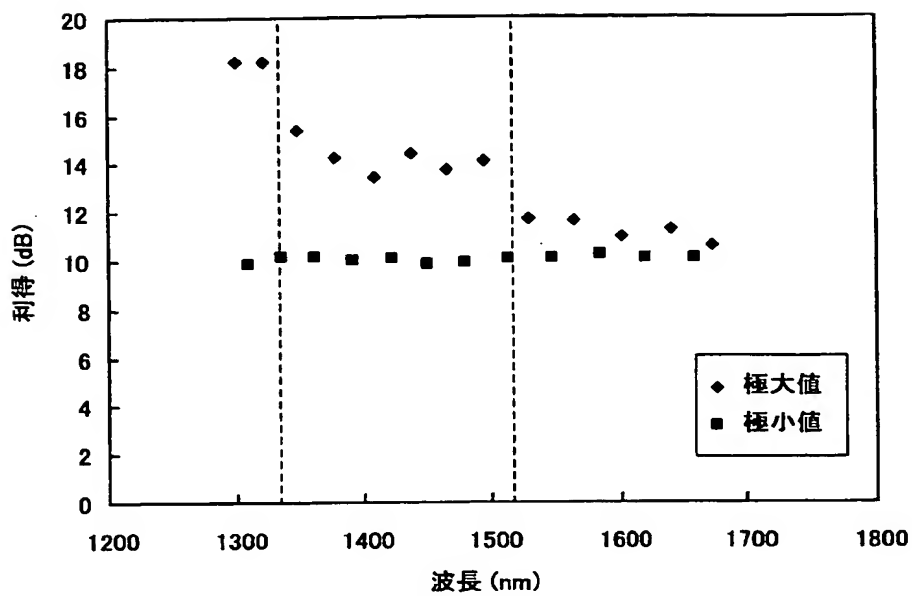
【図 34】

ラマンシフト周波数の約4倍の増幅帯域幅を有する
従来のラマン増幅器の利得波長特性の一例



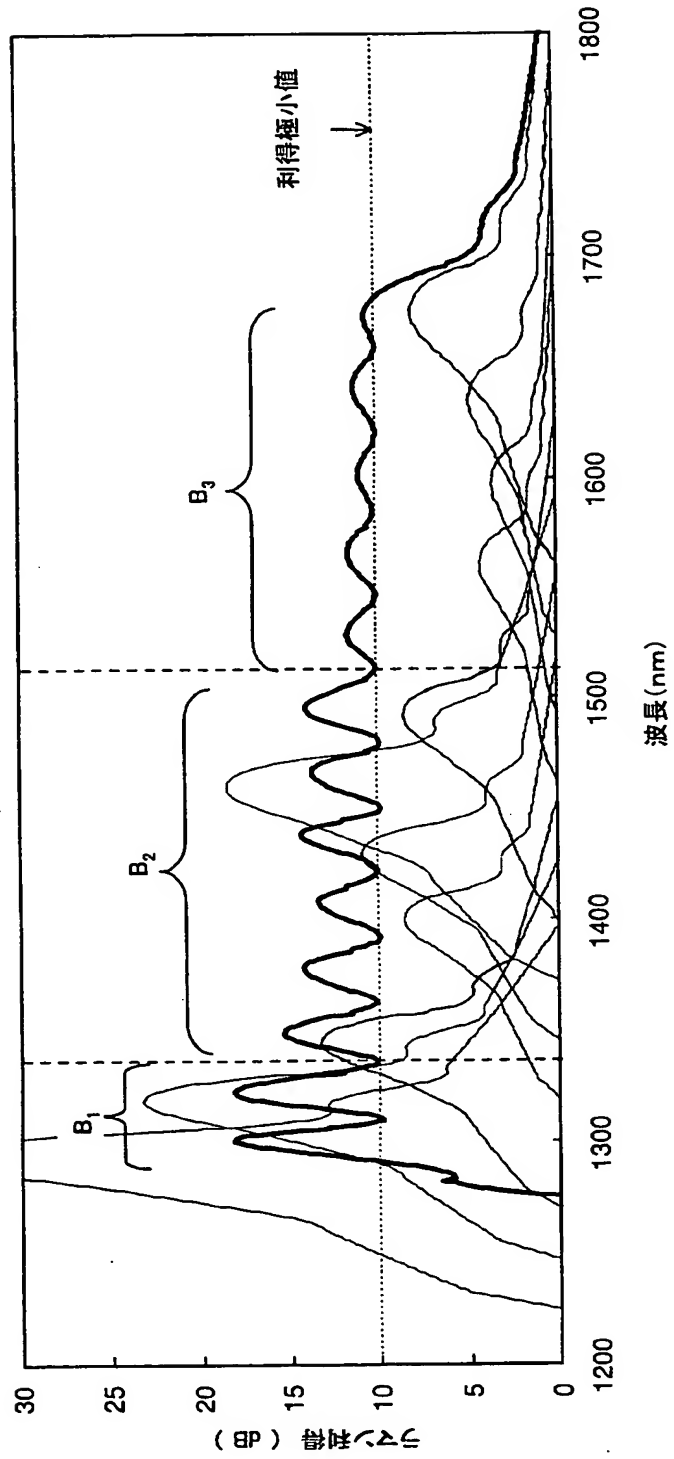
【図 35】

従来のラマン増幅器における利得偏差の一例



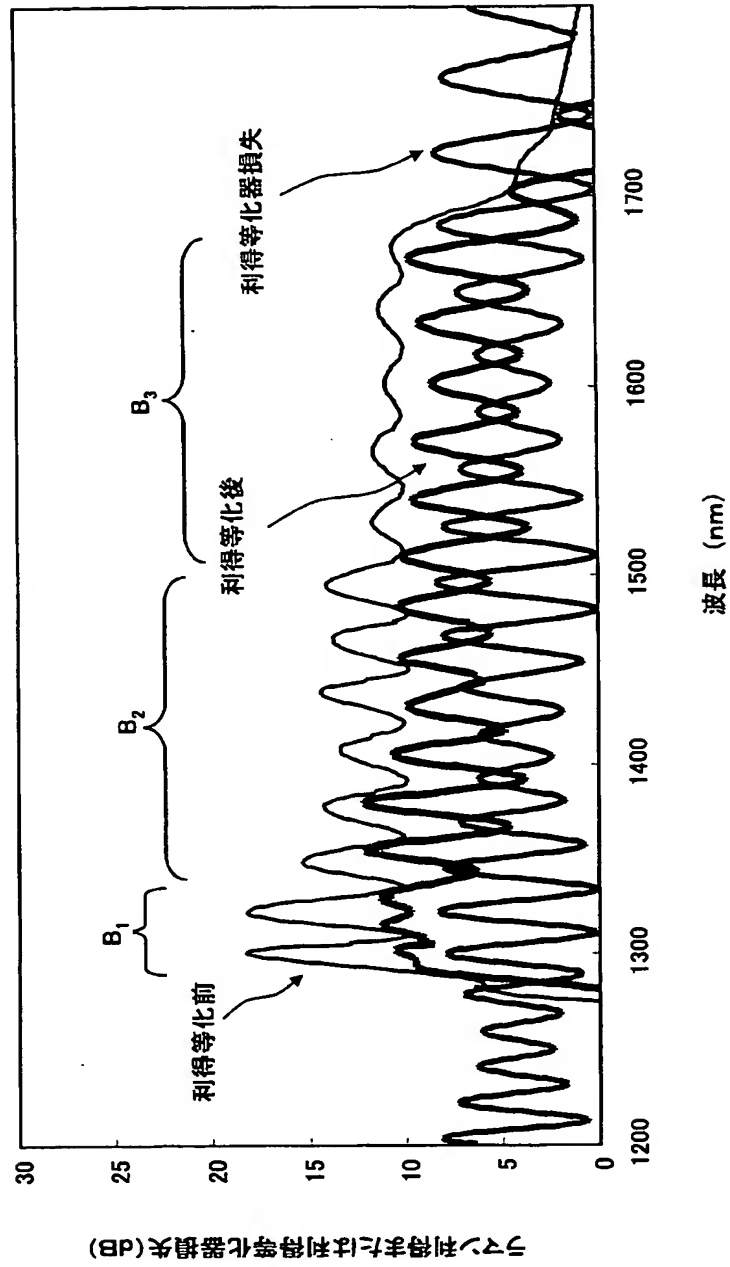
【図 36】

ラマンシフト周波数の約4倍の増幅帯域幅を有する
従来のラマン増幅器の利得波長特性の拡大図



【図 37】

従来のラマン増幅器の利得波長特性について
周期的な損失波長特性を有する光フィルタで利得等化した一例



【書類名】 要約書**【要約】**

【課題】 システム性能劣化を抑えながらラマン利得の波長偏差を容易に低減できるラマン増幅器およびそれを用いた光伝送システムを提供する。

【解決手段】 本発明のラマン増幅器は、ラマンシフト周波数に従って信号光波長帯域を短波長側にシフトした帯域内に等波長間隔で配置された第1励起光と、その第1励起光の波長帯域よりも短波長側および長波長側の帯域に配置され、信号光波長帯域におけるラマン利得のピークの波長間隔が実質的に等しくなるように波長およびパワーが設定された第2励起光と、を増幅媒体にそれぞれ供給してWDM信号光をラマン増幅し、そのWDM信号光のパワーの波長偏差を、ラマン利得のピーク波長間隔に対応した周期性を有する利得等化器を利用して低減する。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 3 - 0 9 3 0 2 3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 2 2 3]

1. 変更年月日

1 9 9 6 年 3 月 2 6 日

[変更理由]

住所変更

住 所

神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号

氏 名

富士通株式会社